

MASATO KOBIYAMA

INFLUÊNCIA DA MINHOCA LOUCA (*Amyntas* spp.
Rosa, 1891) SOBRE O MOVIMENTO DA ÁGUA NO
SOLO, RELACIONADO AO CRESCIMENTO DA
BRACATINGA (*Mimosa scabrella* Benth.)

Tese apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Doutor. Curso de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, Setor
de Ciências Agrárias, Universidade Federal
do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Honório Roberto dos Santos

CURITIBA

1994

MINISTERIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Tese de Doutorado apresentada pelo candidato MASATO KOBIYAMA, sob o título "INFLUÊNCIA DA MINHOCA LOUCA (*Amyntas hawayanus*) SOBRE O MOVIMENTO DA ÁGUA NO SOLO, RELACIONADO AO CRESCIMENTO DA BRACATINGA (*Mimosa scabrella Benth*), para obtenção do grau de Doutor em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração em SILVICULTURA. Após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Tese com média final: (8,6), correspondente ao conceito: (A).

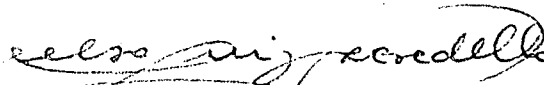
Curitiba, 23 de setembro de 1994



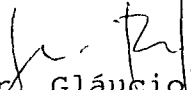
Prof.Dr. Paulo Leonel Libarti
Primeiro Examinador



Prof.Dr. Walter de Paula Lima
Segundo Examinador



Prof.Dr. Celso Luiz Prevedello
Terceiro examinador



Prof.Dr. Gláucio Roloff
Quarto Examinador



Prof.Dr. Honorio Roberto dos Santos
Orientador e Presidente

Ao meu grande amigo “in memoriam”:
Takahiro Odagiri

Ao meu grande herói:
Dunga

À grande cientista e ecologista:
Rachel Carson

Dedico

AGRADECIMENTOS

- O autor deseja expressar seus sinceros agradecimentos as seguintes pessoas e entidades.
- Ao orientador Prof. Dr. Honório Roberto dos Santos, Universidade Federal do Paraná, pela amizade, competente orientação na realização deste trabalho, e ensino da grande importância de organismo no meio ambiente. Este ensino determinantemente alterou as linhas de pesquisas do autor.
- Ao coorientador Prof. Dr. Celso Luiz Prevedello, UFPR, mais do que orientar-me na física do solo, ajudou-me de forma imprescindível na elaboração e estruturação de todo o trabalho.
- À coorientadora Profa. Dra. Beatriz Monte Serrat Prevedello, UFPR, pelos valiosos ensinamentos sobre os aspectos químicos do solo.
- Ao Prof. Dr. Yoshinori Tsukamoto, diretor da faculdade de agricultura da Tokyo University of Agriculture and Technology, pelo ensino de hidrologia e metodologia científica. Este ensino levou o autor para o campo de pesquisas de hidrologia.
- Ao Dr. Junpei Kubota, assistente do laboratório de hidrologia florestal e controle de erosão da Tokyo Univ. of Agric. and Tech., pela amizade e ensino de simulação numérica.
- Ao amigo, Prof. Agenor Maccari Junior, pela participação fundamental ao bom andamento dos trabalhos.
- Aos funcionários Sr. João Luiz Machado, laboratorista do Laboratório de Zoologia do Solo da UFPR, e Sr. Ruy Barbosa da Silva e Sra. Valdina C. Rocha, laboratoristas do Laboratório de Física do Solo da UFPR, pela assistência do trabalho a campo e no laboratório, respectivamente.
- Aos amigos Sr. Claudio Tsuyoshi Ushiwata, estudante do Curso de Pós-Graduação em Agricultura da Tokyo Univ. of Agric. and Tech., e Srta. Cristina Barcik, estudante do Curso de Agronomia da UFPR, pela amizade e apoio de medição a campo.
- Aos funcionários Sr. Miguel Mendes e Sr. Ezequiel D. da Silva pelo apoio de construir o experimento a campo. Sem este apoio, o presente trabalho não seria realizado.
- A Sra. Odete B. Carpanezi, responsável pelo viveiro de produção de mudas florestais - Guatupê do Instituto Ambiental do Paraná, pelo fornecimento de mudas de bracatinga.
- Ao Sr. Yoshiki Shinomiya, pesquisador do Geology Laboratory do Forestry and Forest Products Research Institute, Japão, pelo apoio da pesquisa da revisão bibliográfica do trabalho.
- Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR pela oportunidade concedida para a realização do curso.
- Aos funcionários da Biblioteca do Setor de Ciências Agrárias da UFPR pelo apoio de escrever o trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos.

Aos meus filhos Julia Midori, 2 anos e 7 meses, e Mateus Taiyo, 4 meses, pela sua alegria e suporte espiritual.

Finalmente, à minha esposa Adriana pelo apoio, paciência e seu sorriso.

BIOGRAFIA DO AUTOR

MASATO KOBIYAMA, filho de Shuichi Kobiyama e Kimi Kobiyama, nasceu em Kitakata, Estado de Fukushima, Japão, no dia 02 de março de 1962. Realizou seus estudos primários e secundários em Kitakata Elementary School, Kitakata III Junior High School e Kitakata Senior High School na sua cidade natal.

Em 1980, iniciou o Curso de Matemática na Faculdade de Ciência, da Shizuoka University e saiu deste curso no mesmo ano.

Em 1981, iniciou o Curso de Ciências Especiais da Faculdade de Educação, da Kyoto University of Education, graduando-se em março de 1985.

Em abril de 1985, entrou para o treinamento de trabalho voluntário da Japan Overseas Cooperation Volunteers (JOCV) em Tokyo e trabalhou na Mawuli Secondary School, Gana (África), como professor de física e futebol de julho de 1985 a julho de 1987.

Em outubro de 1987, ingressou no Curso de Especialização em Controle de Erosão da Faculdade de Agricultura de Kyoto University e terminou em março de 1988.

Em abril de 1988, ingressou no Curso de Mestrado em Ciências Florestais da Tokyo University of Agriculture and Technology e obteve o título de Mestre de Agricultura em março de 1991. Durante um ano, de 1989 a 1990, fez estágio na Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal do Rio Grande do Sul e na Companhia Madeireira Eidai do Brasil na Ilha de Marajó.

Em abril de 1991, começou várias pesquisas e projetos nas áreas de controle de erosão, física do solo e hidráulica do sedimento na Companhia Asia Air Survey Co. e no laboratório de hidrologia florestal e controle de erosão da Tokyo University of Agriculture and Technology até novembro de 1991.

Em março de 1992, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Florestal, Área de Concentração Silvicultura, da Universidade Federal do Paraná, concluindo os requisitos para a obtenção do grau e título de Doutor em Ciências Florestais em setembro de 1994.

SUMÁRIO

	pag.
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
SUMMARY.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 BRACATINGA.....	4
2.2 MINHOCA.....	4
2.2.1 Influência nas propriedades químicas do solo.....	5
2.2.2 Influência nas propriedades físicas do solo.....	5
2.2.3 Influência no crescimento de plantas.....	10
2.3 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SOLO.....	12
2.4 SISTEMA DE POROS DO SOLO.....	12
2.5 PROCESSO HIDROLÓGICO.....	15
2.5.1 Processo geral.....	16
2.5.2 Influência da floresta.....	17
2.6 MODELAGEM NUMÉRICA.....	19
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 MATERIAL.....	21
3.1.1 Bracatinga.....	21
3.1.2 Minhoca.....	21
3.1.3 Viveiro.....	21
3.2 MÉTODOS DE TRABALHO NO VIVEIRO.....	21
3.2.1 Delineamento experimental e tratamentos.....	23
3.2.2 Instalação do experimento.....	23
3.2.2.1 Preparação da área.....	23
3.2.2.2 Aplicação das minhocas.....	23
3.2.2.3 Plantio das mudas.....	23
3.2.3 Cuidados no viveiro.....	26
3.2.4 Cronograma de medição a campo.....	26
3.2.5 Coletas das amostras dos solos.....	26
3.3 MÉTODOS DE TRABALHO EM LABORATÓRIO.....	26
3.3.1 Condutividade hidráulica saturada.....	26
3.3.2 Retenção da água (curva característica de água).....	28
3.4 MÉTODOS DE TRABALHO EM ANÁLISE TEÓRICA.....	28

3.4.1 Propriedades hidráulicas do solo.....	28
3.4.2 Sistema de poros do solo.....	29
3.4.3 Equação que governa a densidade de fluxo da água no solo.....	32
3.4.4 Método de diferenças finitas.....	35
3.4.5 Descrição dos modelos completos empregados para análise.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 CONDIÇÃO PLUVIOMÉTRICA.....	42
4.2 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SOLO.....	42
4.3 SISTEMA DE POROS DO SOLO	46
4.4 CRESCIMENTO DA BRACATINGA.....	56
4.5 HIDROGRAMA.....	60
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	70
5.1 CONCLUSÕES.....	70
5.2 RECOMENDAÇÕES.....	71
ANEXO - EQUAÇÕES DE VAN GENUCHTEN (1980).....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura	pag.
3.1 Esquema da distribuição dos blocos experimentais.....	24
3.2 Perfil de uma parte do experimento a campo.....	24
3.3 Plantio das mudas de bracatinga na parcela.....	27
3.4 Continuidade do fluxo num paralelepípedo.....	34
3.5 Discretização da coluna do solo.....	37
3.6 Grade computacional para equação de fluxo unidimensional.....	38
4.1 Variação dos parâmetros das propriedades hidráulicas do solo com a profundidade, Curitiba, 1994: (a) K_s , (b) α , (c) n , (d) θ_s , e (e) θ_r	47
4.2 Distribuição de vários tipos de porosidade do solo, Curitiba, 1994: (a) Tratamento 00, (b) Tratamento 30, (c) Tratamento 60 e (d) Tratamento 90.....	49
4.3 Distribuição vertical da porosidade gerada pelas galerias das minhocas, Curitiba, 1994.....	52
4.4 Curva de $C(\psi)$ com diferentes tratamentos, Curitiba, 1994: (a) Tratamento 00, (b) Tratamento 30, (c) Tratamento 60 e (d) Tratamento 90.....	55
4.5 Distribuição vertical de tamanho médio do poro, D_M (mm), Curitiba, 1994.....	57
4.6 Crescimento da bracatinga em altura de 3 até 7 meses de idade, Curitiba, 1993/94:(a) média de todas as plantas, (b) média de plantas úteis.....	59
4.7 Relação da altura média da bracatinga em fevereiro de 1994, Curitiba, com: (a) aeração do solo, $\theta_s - \theta_c$; (b) água disponível do solo, $\theta_c - \theta_r$	61
4.8 Relação entre o tempo e a descarga no pico do hidrograma.....	66
4.9 Hidrogramas dos Casos 1, 2, 3, 4 e 5.....	67
4.10 Hidrogramas dos Casos 1, 3, 6 e 7.....	67
4.11 Hidrogramas dos Casos 1, 3, 8 e 9.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela	pag.
3.1 Características físico-químicas do solo da área experimental antes da instalação do experimento, Curitiba, 1993: (a) granulometria e (b) composição química.....	22
3.2 Características químicas do esterco de ovino, Curitiba, 1993.....	25
3.3 Relação entre sucção da água do solo (h) e o diâmetro equivalente do poro (d).....	30
4.1 Precipitação (mm) durante o período experimental no Setor de Ciências Agrárias da UFPR, Curitiba, 1993/94.....	43
4.2 Parâmetros das propriedades hidráulicas do solo, com aplicação das equações de Van Genuchten (1980), Curitiba, 1994.....	44
4.3 Valores médios dos parâmetros das propriedades hidráulicas do solo, em quatro diferentes profundidades, Curitiba, 1994: (a) 5cm, (b) 15cm, (c) 25 cm e (d) 35 cm.....	45
4.4 Propriedades hidráulicas do solo, com quatro diferentes tratamentos, Curitiba, 1994.....	45
4.5 Valores de θ correspondentes aos vários valores de sucção, Curitiba, 1994.....	48
4.6 Valor de $\theta_s - \theta_c$ (cm^3/cm^3), Curitiba, 1994.....	48
4.7 Valor de $\theta_c - \theta_r$ em mm, Curitiba, 1994.....	51
4.8 Valores de $\theta_{0,7} - \theta_{1,7}$, $\theta_{1,7} - \theta_{2,7}$ e $\theta_{0,7} - \theta_{2,7}$, em mm, do solo, Curitiba, 1994.....	51
4.9 Valores de $\theta_s - \theta_r$ em mm, Curitiba, 1994.....	51
4.10 Valores de $\theta_s - \theta_{0,47}$ (cm^3/cm^3), Curitiba, 1994.....	51
4.11 Valores de $ C(\psi) $ do solo, em cm^{-1} , Curitiba, 1994.....	53
4.12 Valores de $ \psi_{MÁ} $, $ C(\psi_{MÁ}) $ e D_M , Curitiba, 1994.....	54
4.13 Média mensal da altura da bracatinga e sua sobrevivência nos quatro tratamentos, Curitiba, 1993/94: (a) total de plantas, (b) plantas úteis.....	58
4.14 Peso seco, em grama, da parte aérea da bracatinga, Curitiba, 1994.....	58
4.15 Parâmetros do solo de 9 casos na simulação numérica.....	62
4.16 Condição pluviométrica para simulação numérica.....	62
4.17 Descarga na coluna de solo na simulação numérica.....	64
4.18 Tempo (hora) e descarga (mm/h) em pico do hidrograma obtido pela simulação numérica.....	68

RESUMO : Influência da minhoca louca (*Amyntas* spp. Rosa, 1891) sobre o movimento da água do solo, relacionado ao crescimento da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.).

Foi observada a campo a influência das minhocas (*Amyntas* spp. Rosa, 1891) sobre as propriedades hidráulicas do solo e o crescimento da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.). A observação foi feita no campus do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, no período de março de 1993 a fevereiro de 1994. Usando dados obtidos das propriedades hidráulicas do solo, foram executadas simulações numéricas para avaliar a influência das minhocas sobre o movimento da água no solo. Os resultados mostraram que as minhocas influenciaram as propriedades hidráulicas do solo, especialmente condutividade hidráulica saturada (K_s) e porosidade total (θ_s), até a profundidade de 30 cm, sendo que esta influência se reduziu com o aumento da profundidade. Embora as minhocas tenham alterado a estrutura porosa do solo, somente os poros com diâmetro maior que 0,06 mm foram influenciados. O tamanho médio dos poros também foi influenciado pela ação destes organismos, sofrendo aumento. Em consequência, as minhocas melhoraram a aeração e a condição hídrica do solo para as plantas. Isso gerou como resultado um maior crescimento em altura e maior peso seco das mudas de bracatinga nos tratamentos que receberam as minhocas. As simulações numéricas, com o modelo de fluxo unidimensional, vertical e transiente, mostraram que as minhocas aumentaram o pico do hidrograma no caso em que o escoamento subsuperficial foi dominante no processo chuva-vazão. Entretanto, isto depende da relação entre os aumentos de K_s e θ_s . Se as minhocas provocarem um pequeno aumento em K_s ou um elevado aumento em θ_s , haverá uma redução no pico do hidrograma. Caso ocorra o contrário, um elevado aumento em K_s ou um pequeno aumento em θ_s , este pico aumenta.

SUMMARY: Influence of earthworm (*Amyntas* spp. Rosa, 1891) on soil-water movement and growth of bracinga (*Mimosa scabrella* Benth.).

The influence of earthworm (*Amyntas* spp. Rosa, 1891) on the hydraulic properties of soil and the growth of bracinga (*Mimosa scabrella* Benth.) was evaluated through field observation. Installing an experiment on the campus of the Agrarian Science Sector of Federal University of Paraná, Curitiba, the observation was carried out from March, 1993 to February, 1994. Based on the obtained data of the hydraulic properties, a numerical simulation was carried out to analyse the earthworm's influence on water movement in the soil. The results showed that the earthworms influenced the soil hydraulic properties, especially the saturated hydraulic conductivity (K_s) and the total porosity (the saturated water content, θ_s), till the depth of 30 cm. The influence was reduced with increasing depth. With respect to soil pore structure, the earthworms increased only the porosities, whose pore diameters were larger than 0,06 mm, without changing the other porosities. Furthermore, the earthworms increased the mean pore size. Consequently, they improved soil aeration and water environment for the plants. That is why, in this study, the bracinga grew more in height and in dry weight on soils with the earthworms than on those without the earthworms. The numerical simulation, with one-dimensional, vertical, transient, saturated-unsaturated water flow model, showed that the earthworms could increase the hydrograph peak in case that the throughflow occurred in rainfall-runoff process. This result, however, depends upon the relationship between the increases in K_s and θ_s . If earthworms increase K_s a little and θ_s greatly, the peak would decrease and vice versa.

1. INTRODUÇÃO

A história humana pode ser resumida como uma história de destruição de florestas. O homem tem removido as florestas para utilização do solo na agricultura, plantio de pastagens, construção das cidades. Tudo isto em consequência da pressão causada pelo aumento da população humana, sempre em franco desenvolvimento, como também pelo surgimento de indústrias e desenvolvimento da economia. Recentemente esta atividade atingiu o mundo inteiro, de maneira mais contundente no terceiro mundo, ou seja no desmatamento das florestas tropicais.

Por outro lado, as madeiras têm um importante papel em todas as atividades humanas, por exemplo, fonte de energia, material de construção, fertilidade e papel. Portanto, a madeira e seus derivados são indispensáveis e a atividade de cortar as árvores é uma realidade.

Se não houver cobertura florestal nas margens dos rios e terra nua, ocorre perda de terra na rampa, aumenta o risco de enchente, e pode haver contaminação e assoreamento de rios, lagoas, e mares. Em outras palavras, a floresta propicia o desenvolvimento de um solo química, biológica, e fisicamente adequado, prevenindo vários desastres ecológicos como; erosão superficial, enchentes e poluição de rios. Floresta e solo florestal estão sempre se desenvolvendo para um estado ecologicamente estável sob uma condição climática. Manter ambos neste estado é mais favorável para conservação do meio ambiente, e conseqüentemente a obtenção de um meio hidrologicamente estável.

No Brasil, cada vez mais aumentam as áreas de desmatamento especialmente para fins de desenvolvimento da indústria agrícola e da mineração. Estes desmatamentos normalmente conduzem a áreas degradadas que prejudicam as atividades humanas.

Nos campos florestal e agrícola, a mecanização e o uso inadequado de fertilizantes têm sido progressivamente difundidos e usados para aumentar a produtividade. A mecanização moderna está induzindo a degradação física do solo, e os produtos químicos muitas vezes degradam o solo quimicamente. Conseqüentemente, eles conduzem a uma degradação biológica do solo (KOBİYAMA et al., 1993). A degradação do solo não somente reduz a sua produtividade, mas também pode prejudicar a saúde do homem, e vem sendo discutida a muitas décadas. Para resolver este problema e conseqüente recuperação, os métodos biológicos ou o controle biológico têm sido enfatizados (CARSON, 1962; GRAHAM, 1970).

A recuperação de uma área degradada deveria objetivar o estabelecimento de uma vegetação florestal, pois esta representa exatamente a figura natural da terra. Como exemplo, no estado do Paraná, utiliza-se a bracatinga na recuperação, tendo esta espécie

nativa, crescimento rápido e fácil, também fixando nitrogênio no solo (EMBRAPA-CNPQ, 1988). Conseqüentemente, seus reflorestamentos podem ser considerados como as melhores práticas para recuperação de áreas degradadas.

Embora existam vários métodos de recuperação, KOBIYAMA et al. (1993) mencionaram que o uso de organismos vivos e substâncias orgânicas é o melhor método para recuperação de áreas degradadas, porque esta prática não possui efeitos negativos ou colaterais, não acarretando prejuízos a outros organismos, além de reestabelecer o equilíbrio da natureza. Os mesmos autores recomendaram o uso de minhocas para realizar recuperação de área degradada, ou seja, a revegetação. As minhocas são um dos organismos mais comuns do solo, principalmente no florestal. Os homens, especialmente trabalhadores da agropecuária, têm dado valor a elas desde os tempos antigos. Elas são consideradas um símbolo de boa qualidade de solo. Foi DARWIN (1881) que primeiro realizou um estudo científico sobre a relação entre as minhocas e o solo. Este cientista mencionou a importância das minhocas para a agricultura. Neste século, vários ensaios e tentativas foram realizados para aumentar a produção e a produtividade, usando as minhocas nos campos agrícola e florestal, como os realizados por EDWARDS e LOFTY (1977), SATCHELL (1983), e LEE (1985).

Recentemente, foram realizados estudos mostrando também a relação das minhocas com a poluição ambiental. HELMKE et al. (1979) e IRELAND (1983) mostraram a eficiência das minhocas para estudar a poluição causada pelos metais pesados. Há ainda algumas pesquisas sobre a relação entre as minhocas e a contaminação radioativa do solo (POKARZHEVSKY e KRIVOLUTSKY, 1975; KRIVOLUTSKY et al., 1982). A exigência crescente de métodos para aproveitamento de lixo doméstico e industriais resultou em grande interesse sobre a possibilidade de usar minhocas como os decompositores naturais (FOSGATE e BABB, 1972; SABINE, 1983).

Assim, utilizando-se as minhocas como um controlador biológico poderemos melhorar a qualidade do meio ambiente para o homem. As minhocas influenciam os meios orgânico e inorgânico do solo através de sua atividade de construção de galerias, digestão, e excreção. Essas atividades normalmente provocam alterações que melhoram as propriedades física, química e biológica do solo, aumentando, conseqüentemente, o crescimento de plantas. No campo agrícola, foram feitos diversos estudos sobre as influências das minhocas no crescimento de plantas cultivadas. Mas existem pouquíssimos estudos sobre suas influências no crescimento de árvores. No Brasil, não existe pesquisa científica nesta área.

No estado do Paraná, a demanda de bracinga é grande e sua importância é indiscutível. Há, portanto, uma grande necessidade de pesquisar a influência das minhocas

sobre o crescimento desta essência. Do ponto de vista de conservação ecológica é bastante significativo promover o crescimento da bracatinga sem os métodos mecânicos e químicos, e sim usando métodos biológicos. O fato de que a bracatinga é uma espécie nativa no sul do Brasil valoriza ainda mais esta experiência.

Foram pesquisadas as influências das minhocas sobre as mudanças nas propriedades físicas e químicas do solo, não sendo porém, as mudanças das propriedades do solo que diretamente influenciam o crescimento das plantas. As mudanças provocadas pelas minhocas, primeiro, alteram a dinâmica da água, gases, e solutos do solo e determinam suas condições (quantidade e localização). São estas condições que diretamente influenciam o crescimento das plantas. Portanto, não só as propriedades do solo, mas também a dinâmica da água, gases, e solutos deve ser observada, possibilitando a avaliação quantitativa da influência indireta das minhocas sobre o crescimento das plantas. A dinâmica das substâncias é enfatizada por CAPRA (1983), e é essência fundamental da realidade.

A estimativa quantitativa facilita a simulação numérica que possibilita uma previsão fácil sobre os efeitos de práticas que utilizam as minhocas. Finalmente, isso permite a avaliação econômica e ecológica sobre uso de minhocas em reflorestamentos.

Visando estes conceitos, os objetivos deste trabalho foram os seguintes:

1. determinar as propriedades hidráulicas do solo alteradas pela influência de diferentes populações de minhoca louca (*Amyntas* spp. Rosa, 1891), populações estas controladas a campo;
2. avaliar como as minhocas alteram a estrutura porosa do solo;
3. observar o crescimento de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) sob a influência de diferentes populações da minhoca a campo;
4. avaliar, com um modelo numérico de fluxo unidimensional, vertical e transiente, a influência das minhocas sobre o movimento da água no solo, sob o ponto de vista hidrológico.

Além disso, pretende-se comprovar a seguinte hipótese: As minhocas, através de sua atividade biológica (construção de galerias e produção de dejetos) no solo, propiciam melhorias da aeração e da condição hídrica do mesmo, ocasionando maior desenvolvimento das plantas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BRACATINGA

A bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) da família leguminosae e super-família Mimosoideae é uma espécie nativa da região sul do Brasil. Segundo ROTTA e DE OLIVEIRA (1981), a área de sua ocorrência estende-se desde a latitude de 23°50's até 29°40's e longitudes de 48°30'W até 53°50'W, onde predomina o tipo clima Cfb, segundo a classificação climática de Köeppen, em altitudes que variam de 500 a 1500 m.

CARDOSO (1979) citou as diversas aplicações que se poderia obter da bracatinga como: lenha, carvão, forrageira, produção de mel, escoras em construção civil, fabricação de papel, chapas de aglomerados e madeira serrada. Também é possível a obtenção de etanol e gasogênio, substitutivos da gasolina como combustível. Além disso, devido a seu rápido crescimento, REITZ et al. (1978) a consideram muito indicada para reflorestamentos, recuperação de área degradada e como quebra-ventos.

Segundo EMBRAPA - CNPF (1988), a bracatinga é muito sensível às condições de drenagem dos terrenos. Em solos mal drenados, apresenta o crescimento reduzido e a mortalidade elevada. Esta é sua principal restrição. A bracatinga pode ocupar terrenos rasos. Na Costa Rica, os principais fatores limitantes para o estabelecimento de plantações de bracatinga são a compactação do solo, a competição por plantas invasoras e a deficiência de fósforo no solo. Em terrenos compactados por pastoreio intensivo, tem sido observada mortalidade elevada. No Brasil, a eliminação de camadas de baixa permeabilidade, por subsolagem, para recuperação de áreas degradadas, tem sido altamente benéfica por melhorar a drenagem interna.

2.2 MINHOCA

As minhocas têm sido pesquisadas por vários motivos através de vários métodos desde DARWIN (1881). Recentemente, foram publicados alguns livros sobre minhocas (por exemplo, EDWARDS e LOFTY, 1977; SATCHELL, 1983; LEE, 1985) e as pesquisas sobre elas têm sido sistematizadas gradualmente. Segundo VIEIRA (1986), as minhocas são animais cilíndricos de corpo longo ou comprido, afilado ligeiramente nas duas extremidades e um pouco achatado na região posterior. A região dorsal é mais escura e a ventral mais clara e achatada. Cabeça indistinta situada na extremidade anterior do corpo, enquanto que na posterior, fica localizado o ânus. Não possuem tentáculos, olhos, apêndices cefálicos, cirros ou parápodes.

As minhocas são de grande importância nos solos florestal e pastoril com acidez superior a 4,5, pois elas são os principais agentes de misturar *litter* na superfície do solo com o solo, e fazendo isso, ajudam manter o solo superficial solto e bem aerado (RUSSEL, 1973).

Elas são muito dependentes de umidade do solo (LAVERACK, 1963) e afetam diversas propriedades físicas, químicas e biológicas através de suas atividades de escavar e de suas excreções (LAL, 1988). LAL (1988) acentuou a importância de estudar as influências de minhocas sobre as propriedades do solo nas regiões úmidas e semiúmidas.

2.2.1 Influência nas propriedades químicas do solo

As minhocas afetam a composição química do solo e a distribuição dos nutrientes para plantas de várias maneiras.

VSEVOLODOVA-PEREL' e SIZEMSKAYA (1990) examinaram o efeito das minhocas introduzidas num sítio de reflorestamento em deserto. Vinte anos depois da introdução, os pesquisadores notaram que houve um acentuado aumento no pH, húmus, relação C/N e nitrogênio.

As minhocas têm a importante função de neutralização de produtos ácidos. Isto foi mostrada por SAMEDOV e NADIROV (1990). Eles sugeriram que a presença e atividade das minhocas aumentam a fertilidade e a produtividade biológica do solo. Segundo BEZBORODOV e KHALBAYAVA (1990), o solo contendo minhocas e seus dejetos apresentou concentrações elevadas de nutrientes. DE VLEESCHAUWER e LAL (1981) observaram que os dejetos de minhocas continham mais carbono orgânico, nitrogênio total, fósforo disponível e cátions trocáveis que o solo de onde os dejetos foram derivados. Dados similares foram informados por LEE (1967) e WASAWO e VISSER (1959).

EDWARDS e LOFTY (1977) e LEE (1985) mostraram evidências abundantes que as interações entre minhocas e microrganismos são de suma importância na degradação de matéria orgânica e na liberação de nutrientes minerais para o solo.

2.2.2 Influência nas propriedades físicas do solo

A porosidade é a principal propriedade física que as minhocas influenciam diretamente. HOEKSEMA e JONGERIUS (1959) mostraram que a porosidade total foi 30 a 40% para o solo sem minhocas e 60 a 70% para o mesmo tipo de solo com minhocas (200 g/m^2) e que a maior parte do espaço ocupado pelo ar foi de galerias das minhocas. Em outro campo, EDWARDS e LOFTY (1977) citaram que as galerias das minhocas contribuíram com cerca de 5% de volume total do solo. Diâmetros das galerias variam com os tamanhos das minhocas, mas geralmente são 1 a mais de 10 mm. (LEE, 1985). VAN RHEE (1969) concluiu que a presença de minhocas resultou não tanto em aumento da porosidade total quanto na redistribuição do espaço dos poros. VAN DE WESTERINGH (1972) confirmou essa conclusão de VAN RHEE (1969) em outra pesquisa.

Embora HOPP (1985) tenha mostrado uma correlação positiva entre populações de minhocas e uma proporção de macroporos para o volume total do solo, NORDSTRÖM e

RUNDGREN (1974) não obtiveram a mesma correlação entre porosidade e a biomassa total de minhocas, e mencionaram que é difícil distinguir os efeitos das minhocas sobre a porosidade dos solos quando existem raízes.

Contudo, a grande importância dos macroporos sobre o movimento de água do solo foi enfatizada por DIXON e PETERSON (1971), mostrando que a infiltração pudesse ser aumentada dentro de alguns meses pela atividade de minhocas. SLATER e HOPP (1947), HOPP e SLATER (1948), GUILD (1952), STOCKDILL (1966) e CARTER et al. (1982) mostraram que a infiltração foi de duas a dez vezes maior no solo com minhocas do que no solo sem minhocas.

WILKINSON (1975) estudou o efeito de rotações de grama sem cultivo, sobre infiltração e concluiu que seu aumento no sítio sem cultivo foi causado principalmente pela atividade das minhocas, mostrando uma relação significativa entre a taxa da infiltração e o tempo sem cultivo. Revisando os trabalhos de WILKINSON (1975), WILKINSON e AINA (1976), LAL e CUMMINGS (1979) e LAL et al. (1978), LAL (1979) atribuiu a alta taxa de infiltração para atividade abundante de minhocas. HOOGERKAMP et al. (1983) observaram e mediram a infiltração da água num solo pastoril 10 anos depois da introdução de minhocas, e registraram uma alta taxa de infiltração. TISDALL (1978) examinou o efeito de minhocas sobre a infiltração e a macroporosidade do solo em um pomar irrigado na Austrália, demonstrando que, no pomar tratado, a população de minhoca, a taxa de infiltração e a macroporosidade aumentaram depois de 3 anos. Na área agrícola, uma influência positiva das minhocas sobre a preservação de alta permeabilidade do solo foi demonstrada com observação por 22 anos (URBÁNEK e DOLEZAL, 1992).

Em laboratório, usando vasos, ZACHMANN e LINDEN (1989) mostraram que a atividade das minhocas propiciou o aumento das taxas de decomposição de resíduos e da infiltração por causa do fluxo no macroporo.

Observando as galerias das minhocas, EHLERS (1975) calculou que a taxa máxima de infiltração das galerias é maior que 1 mm/min e mencionou que a infiltração através das galerias pode ocorrer somente com altas intensidades de chuva. No caso de baixa intensidade, toda a água infiltra através da matriz do solo. Isso indica que os poros produzidos pela atividade de minhocas afetam a infiltração e a difusão de gás nas regiões mais úmidas. Esse aspecto foi indiretamente provado por BARLEY (1959) que concluiu que numa zona seca, minhocas têm pouca capacidade em promover o movimento de água do solo.

SMETTEN (1992) apresentou algumas equações simples para descrever a relação de minhoca com as propriedades hidráulicas do solo, dizendo que minhoca aumenta a infiltração através de galerias e mencionando a importância de uso das equações para planejamentos adequados.

A relação entre a população de minhocas e a taxa de infiltração também foi estudada por KLADIVKO et al. (1986). Os resultados dos experimentos em laboratório demonstraram que o solo com maior população de minhocas tem a taxa mais alta de infiltração. Segundo JOSCHKO et al. (1992), através de experimento em colunas, tanto a condutividade hidráulica saturada e taxas de percolação aumentaram com correlação positiva ao comprimento de galeria de minhocas depois de algumas semanas.

Na área da horticultura, não foi observado o efeito de minhocas sobre a condutividade hidráulica saturada dos solos superficiais através da medição *in situ*. Mas, os aumentos obtidos de infiltração da água e de permeabilidade do ar indicaram que as minhocas desenvolveram a estrutura da matriz do solo (SPRINGETT et al., 1992).

As minhocas influenciam a retenção de água do solo. STOCKDILL (1966) introduziu minhocas num pasto na Nova Zelândia e observou isto. A capacidade de campo do solo em profundidades de 0-30 cm foi 17% mais alta no pasto com minhoca do que no pasto sem minhocas. Na mesma profundidade, a água disponível para plantas, que é equivalente à capacidade de campo menos a umidade residual, foi consistentemente mais alta no solo com minhocas do que no solo sem minhocas. STOCKDILL (1982) comparou os pastos com e sem minhocas, e observou que a taxa de infiltração duplicou, a capacidade de campo aumentou de 17%, e também a água disponível para as plantas aumentou em 18 mm no solo em profundidades de 0-30 cm com minhocas. Ele notou que a melhor infiltração reduziu o escoamento e o risco de erosão e de enchente.

AINA (1984) avaliou a contribuição de minhocas na porosidade e infiltração num solo tropical das áreas florestal e agrícola. A porosidade total e a porosidade de transmissão aumentaram por 12 e 30%, respectivamente, 8 meses depois da inoculação das minhocas na área florestal, e 5 e 13%, respectivamente na área agrícola. A infiltração também aumentou em 3,6 vezes na área florestal, mas não foi observado um aumento significativo de infiltração na área agrícola.

Como resultado de alterações de infiltração e retenção de água, outras condições físicas também são influenciadas secundariamente. Por exemplo, o ciclo de nutrientes e o desenvolvimento de estrutura micromorfológica do solo (BOSTROM e LOFS-HOLMIN, 1986; SHAW e PAWLUK, 1986; PAWLUK, 1987). A função das minhocas na hidrologia do solo é ainda incerta, embora o transporte preferencial de água e solutos através das galerias das minhocas tenha sido informado por LINDEN e DIXON (1976); ZACHMANN et al. (1987); EDWARDS et al. (1988); EDWARDS et al. (1989); SHIPITALO et al. (1990), entre outros. EDWARDS et al. (1990 e 1992) notaram a importância de galerias das minhocas na hidrologia em campo sem cultivo. As diferentes respostas hidrológicas foram devidas às atividades das minhocas na pesquisa destes autores.

Usando o método de perfil de Br^- a campo, ZACHMANN et al. (1987) mostraram que o aumento da atividade das minhocas produziu um aumento na taxa de infiltração e que ocorreu um encurtamento (*short-circuiting*) característico dentro da matriz do solo, por causa do fluxo no macroporo formado pelas galerias sinuosas das minhocas. TROJAN e LINDEN (1992) determinaram, em laboratório, o efeito de microrelevo de superfície sobre os movimentos de água, Br^- e tinta nas galerias, com intensidades diferentes de chuva. Os resultados destes autores sugerem que as galerias podem ser importantes para transportar água com maior profundidade no solo, mas que o pequeno número das galerias é responsável pelo deslocamento profundo de água.

Foi pesquisada a relação entre as minhocas e a aeração do solo por LEE (1985), o qual calculou o volume das galerias de minhocas, usando como base os dados de KRETZSCHMAR (1978). Este pesquisador estudou o número, as dimensões e as distribuições das galerias no solo. O volume foi de $0,006 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ em profundidades de 0-20 cm, $0,009 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ em 20-40 cm, e $0,005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ em 40-60 cm. Este mencionou que estes volumes representam 13,3%, 18,8% e 10,4%, respectivamente, do espaço mínimo requerido para a ocupação do ar do solo, considerando que a aeração não é suficiente para o crescimento máximo de plantas, quando mais de 90% da porosidade total fica ocupada pela água.

Os dejetos das minhocas são tão importantes para modificação das propriedades do solo quanto suas galerias. Os dejetos são considerados como agregados do solo. As análises granulométricas dos dejetos mostram que, em geral, as minhocas preferencialmente ingerem as frações de menores tamanhos de partículas sendo que esses dejetos usualmente contêm proporções mais altas de argila e silte e mais baixa de areia do que o solo adjacente (NYE, 1955; WATANABE, 1975; SHARPLEY e SYERS, 1976). Segundo BOLTON e PHILLIPSON (1976), o tamanho de partículas ingeridas é relacionado com o tamanho da minhoca.

Os dejetos das minhocas são muitas vezes mais estáveis mas, às vezes, menos estáveis que outros agregados do solo. Sua estabilidade depende da concentração e do tipo de matéria orgânica, e também da atividade microbiana. BEZBORODOV e KHALBAYEVA (1990) informaram que a quantia de húmus no dejetos foi 76% maior que a do solo e que sua resistência contra o impacto de água foi 7,4 vezes maior do que a do solo adjacente.

HOPP (1946) e VAN DE WESTERINGH (1972) estimaram que até 50% de agregados na camada superficial do solo foi de dejetos de minhocas. DOBROVOL'SKII e TITKOVA (1960) notaram que todos os agregados no horizonte A1 foram praticamente de dejetos e seus resíduos em solo florestal.

LAL e AKINREMI (1983) compararam as propriedades físicas dos dejetos com as dos solos na Nigéria. Os dejetos tiveram maior capacidade de retenção de água do que os

solos. Com experimentos em casa de vegetação, KLADIVKO et al. (1986) investigaram o efeito de minhocas sobre a estabilidade de agregados e a taxa de infiltração do solo, e notaram que as minhocas aumentaram o tamanho e a estabilidade dos agregados e a taxa de infiltração e que o crostamento do solo superficial foi bastante reduzido nos solos onde as minhocas foram ativas.

Segundo LEE (1985), que resumiu diversos trabalhos sobre a quantidade de dejetos de minhocas em vários tipos de meio ambiente, a atividade de produzir os dejetos usualmente não é contínua no ano todo. Assim, a presença de minhocas melhora, em geral, as condições do solo. Segundo TISDALL (1978, 1985) em levantamentos nos pomares e nos campos de cultivo irrigados, na Austrália, as minhocas podem substituir o cultivo mecânico e prover o método sem cultivo para o campo, mantendo o solo bem estruturado e estável.

A propósito, geralmente acredita-se que as minhocas, pela atividade de produzir galerias e dejetos, aperfeiçoam a estabilidade de agregados do solo e assim tornam-se benéficas para prevenir o solo da erosão. Afirmções como a de BRADY (1984) são comuns na literatura: "Sem nenhuma dúvida, as minhocas aumentam tanto o tamanho quanto a estabilidade dos agregados do solo." Algumas pesquisas, entretanto, indicam que a atividade das minhocas contribui para a erosão e degradação do solo (DARWIN, 1881; SHARPLEY et al., 1979). HAZELHORR et al. (1981) e VAN HOOFF (1983) observaram que a remoção de *litter* pelas minhocas promoveu a erosão nas áreas florestais. MADGE (1969) notou que nas áreas tropicais, até 80% dos dejetos de minhocas foram removidos durante a estação de chuva. SHARPLEY et al. (1979) observaram que, quando as minhocas dos lotes pastoris permanentes foram eliminadas, uma tripla redução na taxa de infiltração e um duplo aumento de escoamento ocorreram mas, surpreendentemente, ocorreu a erosão quase quatro vezes menor. Através de experimentos em laboratório, SHIPITALO e PROTZ (1988) mostraram que os dejetos novos na superfície contribuíram para a erosão e o crostamento por causa de sua susceptibilidade para dispersão, e notaram que a atividade de produzir os dejetos intensificaria a estabilidade dos dejetos, se estes não estivessem sujeitos à dispersão antes de ficarem estabilizados pelo envelhecimento e pela secagem.

A infiltração da água pelas galerias das minhocas não é sempre benéfica. Segundo SMITH e PETERSON (1982), a infiltração pelas galerias amplas (25 mm de diâmetro) e extensivas de minhocas, na Austrália, resultou em deslizamentos e em colapso das barragens de terra para reservar água.

Pois assim, as minhocas têm influência sobre infiltração, drenagem, retenção de água e aeração. Os efeitos aparentemente não são constantes em qualquer sítio, mas devem ser reconhecidos como importantes onde as minhocas são numerosas e provavelmente significativos ainda que a população seja pouca (LEE, 1985).

Além disso, tais atividades de minhocas como construção de galerias e produção de dejetos contribuem para a gênese do solo com o desenvolvimento de suas camadas superficiais. BAL (1982) mostrou que as minhocas consumiram cerca de 100 a 200 ton/ha/ano e conseqüentemente elas geraram 6 a 12 centímetro do horizonte A por menos de 10 anos. HOOGERKAMP et al. (1983) também calcularam a velocidade de geração do horizonte A e concluíram que depois de 8 a 9 anos de inoculação de minhocas numa área úmida, o horizonte A aumentou de 5 a 8 cm.

2.2.3 Influência no crescimento de plantas.

Os efeitos benéficos da atividade de minhocas sobre o crescimento e o desenvolvimento de plantas têm sido estudados extensivamente, mas é difícil quantificá-los. Os efeitos usualmente aparecem indiretamente. Como acima mencionado, a atividade influencia primeiro as propriedades do solo que, por sua vez, influenciam o crescimento. Os efeitos das minhocas sobre o crescimento são significativos.

HOPP e SLATER (1948) mostraram que a presença de minhocas estimulou o crescimento do trevo em solo pastoril, e atribuíram o aumento do crescimento principalmente pela influencia das minhocas sobre estrutura do solo associada ao aumento da taxa de infiltração.

Foi realizada a maioria dos trabalhos publicados sobre os efeitos das minhocas no crescimento da pastagem na Nova Zelândia (NIELSON, 1951; WATERS, 1951; STOCKDILL, 1959; DUFF, 1958, etc.), demonstrando que a presença das minhocas aumentaram a produção da pastagem. WATKIN e WHEELER (1966) relacionaram o número e a composição em espécies de minhocas para a produção e a composição em espécies, de pastos. Segundo eles, a relação não foi evidente até que os pastos tivessem 3 anos, tendo a partir daí uma correlação positiva, e no pasto com 5 anos, a correlação foi mais notável entre a biomassa de minhocas e a produção pastoril. STOCKDILL (1982) demonstrou que ocorreu aumento de produção pastoril associado com as mudanças de propriedades químicas e físicas do solo quando as minhocas estavam presentes. Na Holanda, também foi reportado o aumento da produção por causa da presença de minhocas (HOOGERKAMP et al., 1983).

Na agricultura, foram provados aumentos de produção e crescimento de plantas devido à presença de minhocas (HOPP e SLATER, 1949; VAN RHEE, 1965). Por outro lado, EDWARDS e LOFTY (1980) demonstraram que as diferenças em produções não foram aparentes entre ausência e presença de minhocas e que o peso total de raízes e sua profundidade de penetração aumentaram na área inoculada com minhocas.

Na área tropical, as minhocas tropicais aumentaram as biomassas do milho e um pasto graminoso, e foi observada uma correlação de biomassa das minhocas com as biomassas de milho e do pasto graminoso (SPAIN et al., 1992).

Foram examinados por ALDAG e GRAFF (1975) os efeitos das minhocas sobre a produção e a qualidade da aveia. As minhocas aumentaram a produção, a proteína total nos grãos da aveia e nitrogênio na proteína do tecido. Mas as minhocas nem sempre aumentam todas qualidades das plantas. Segundo ATLABINYIE e VANAGAS (1982), os experimentos com cevada e centeio em vasos e em campo, com e sem minhocas, mostraram vários efeitos sobre a qualidade do grão.

Em pomar, VAN DE WESTERINGH (1972) mostrou que não foi aparente o efeito das minhocas na produção de frutas. VAN RHEE (1977) estudou esses efeitos também e demonstrou que houve 70% de aumento de agregados com minhocas mas que houve somente 2,5% de aumento de produção de frutas, frisando que este aumento não foi significativo.

Assim, há alguma relação entre atividade de minhocas e produção de plantas perenes, tais como árvores frutíferas. Essa relação seria causada particularmente pela influência das minhocas na estrutura e infiltração da água no solo, e isto provavelmente seria evidente depois de muitos anos (LEE, 1985).

Há pouca evidencia direta dos efeitos de minhocas sobre o crescimento de árvores. ZRAZHEVSKII (1958) tratou as mudas de dois tipos de árvores em vasos com e sem minhocas e atribuiu o aumento de crescimento para um aumento das taxas de decomposição e ciclo de nutrientes por causa da presença das minhocas. Semelhantemente, MARSHALL (1971) mostrou que mudas de abeto, que cresceram em vasos por um ano, aumentaram a taxa de crescimento dos pesos de tronco quando as minhocas estavam presentes.

Em experimento com betula (HAIMI et al., 1992), uma muda foi plantada em cada vaso com e sem minhocas. Depois de 51 semanas, foram medidas as biomassas de folha, caule e raízes das plantas. Os resultados mostraram que as biomassas de folha e caule dos vasos com minhocas aumentaram em 33 e 24%, respectivamente, e que a biomassa de raízes teve pouca redução com a presença das minhocas.

De qualquer maneira, pode-se afirmar que a presença de minhocas aumenta o crescimento de plantas. Isto indica que as minhocas devem ser consideradas importantes. Segundo STOCKDILL (1982), a relação de custo/benefício indicam que a introdução de minhocas é muito proveitosa para agricultores que possuem pastos improdutivos.

Os estudos da influência das minhocas sobre o crescimento de plantas são indiscutíveis. LOGSDON e LINDEN (1992) acentuaram a ineficiência de estudos utilizando vasos e enfatizaram pesquisas em campo com taxas reais de inoculação de minhocas e comparações estatísticas.

2.3 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SOLO

As relações entre carga de pressão (ψ), umidade volumétrica (θ), e condutividade hidráulica (K) são as mais importantes dentre as propriedades físicas do solo para estudar o movimento de água no solo. Durante os últimos 50 anos, diversos métodos foram desenvolvidos para determinar estas relações in situ e em laboratório (KLUTE, 1986). Também várias equações e parâmetros têm sido propostos. A maioria delas foram revistas e discutidas por NISHIGAKI (1983) e HINO et al. (1989).

A relação entre ψ e θ é conhecida como curva de retenção ou curva característica da água no solo e é expressa pela função $\theta(\psi)$. BROOKS e COREY (1964), AHUJA e SWARTZENDRUBER (1972), HAVERKAMP et al. (1977), VAN GENUCHTEN (1980), TANI (1982) propuseram várias equações de $\theta(\psi)$.

Por outro lado, a condutividade hidráulica é expressa como a relação entre K e θ ou entre K e ψ . A relação $K(\psi)$ é a mais comumente usada, especialmente para análise numérica. Foram propostas várias equações para $K(\psi)$, como por exemplo, BROOKS e COREY (1964), CAMPBELL (1974), MUALEM (1976), VAN GENUCHTEN (1980), entre outros.

2.4 SISTEMA DE POROS DO SOLO

Em geral, um solo possui dois tipos específicos de poros: os macro e os microporos (BRADY, 1984). Segundo HILLEL (1980a), os macroporos são, na sua maioria, cavidades de interagregados que atuam como os principais caminhos para infiltração e drenagem da água, bem como para a aeração. Os microporos, por sua vez, são as capilaridades dos intragregados pela retenção de água e de solutos. A diferenciação prática entre estes, porém, é algo muito difícil, sendo esta separação normalmente arbitrária.

KIEHL (1979) também classificou os macroporos como os maiores poros, geralmente preenchidos pelo ar do solo. De maneira semelhante, os microporos são definidos como os menores poros, capilares, principais responsáveis pelo armazenamento da água.

Há uma tendência, entre os pesquisadores, de primeiro definirem a macroporosidade. Isto gerou, como consequência, uma tendência a determinar a microporosidade pela diferença entre a porosidade total e a macroporosidade. REICHARDT (1987) definiu a macroporosidade como uma porosidade livre de água, sendo assim constituída pelos poros maiores com diâmetro maior que 0,05 mm, o que corresponde a uma sucção de 60 cm de água.

A macroporosidade foi definida por NELSON e BAVER (1940) como a porosidade não-capilar. Tais autores também indicaram como limite de separação entre esta e a microporosidade, o diâmetro de 0,1 mm. Este diâmetro mínimo da macroporosidade foi definido por MARSHALL (1959) como 0,03 mm. BOUMA et al. (1977) definiram o mesmo como 0,1 mm e GERMANN e BEVEN (1981) como 3 mm. Este diâmetro pode, as vezes, possuir um valor maior, como quando delimitado pelo diâmetro de galerias de minhocas (EHLERS, 1975), dos canais formados pelas raízes (AUBERTIN, 1971), e rachaduras de contração do solo (LEWIS, 1977).

EDWARDS et al. (1979) usaram valores de 5 e 10 mm para os diâmetros de poro em um estudo de modelagem numérica para avaliar os efeitos dos poros não-capilares sobre a infiltração.

Esta desuniformidade no uso dos termos ,macro e microporosidade, pode conduzir a ambigüidade, particularmente com o interesse renovado pelos fenômenos de canalização da água no solo (THOMAS e PHILLIPS, 1979).

Ao introduzir o conceito de mesoporosidade, LUXMORE (1981) propôs uma classificação dos poros do solo. Nesta classificação, os macroporos são definidos como os poros maiores que 1 mm, e geram o fluxo do canal quando ocorrem o alagamento superficial e o lençol freático pousado. Os mesoporos são os poros com diâmetro compreendido entre 0,01 e 1 mm, responsáveis pela drenagem sujeita a força gravitacional. Os poros com diâmetro inferior a 0,01 mm, passam a ser definidos como microporos, que influenciam a evapotranspiração.

RUSSELL (1973) sugeriu outra classificação, separando os poros em: poros grosseiros ($>0,2$ mm), poros médios (0,02 - 0,2 mm), poros finos (0,002 - 0,02 mm) e poros muito finos ($<0,002$ mm). Na classificação proposta por EHLERS (1973) a divisão foi feita em: poros grandes ($>0,03$ mm), poros médios (0,003 - 0,03 mm), poros pequenos (0,0002 - 0,003 mm) e poros muito pequenos ($<0,0002$ mm). Outra proposta, feita por BREWER (1964), separa os poros como macroporo grosseiro (>5 mm), macroporo médio (2 - 5 mm), macroporo fino (1 - 2 mm), macroporo muito fino (0,075 - 1 mm), mesoporo (0,03 - 0,075 mm), microporo (0,005 - 0,03 mm), ultramicroporo (0,0001 - 0,005 mm) e crioporo ($<0,0001$ mm).

Criticando todos estes tipos de classificações, que dividem os poros arbitrariamente, e enfatizando a necessidade de considerar-se os processos que ocorrem continuamente no solo, SKOPP (1981) afirmou ser a simples definição do tamanho um indicador inadequado para uma classificação. Propõe este autor uma classificação qualitativa, usando dois tipos: macroporosidade e porosidade matriz. A macroporosidade sendo definida como a porosidade formada pelos poros que fornecem o fluxo preferencial, e a porosidade matriz sendo definida como a porosidade que transmite água e solutos com menor velocidade.

Uma divisão proposta por OKA (1986), em uma simulação numérica, também separa os poros em macroporos e poros matrizes, usando o valor de 1 mm como limite para sua separação.

Uma revisão sobre a importância dos macroporos sobre o fluxo da água no solo foi feita por BEVEN e GERMANN (1982). Estes autores detectaram implicações sobre o movimento rápido dos solutos e poluentes através do solo.

Considerando o papel hidrológico da porosidade, TAKESHITA (1985) classificou os poros como:

Macroporo	$\left\{ \begin{array}{l} \text{poro - muito - grande (< pF0 em sucção, > 3 mm em diâmetro)} \\ \text{poro - grande (0 - pF 0,7; 0,6 - 3 mm)} \end{array} \right.$
Poros - Grosseiros	
	$\left\{ \begin{array}{l} \text{poro - médio (0,7 - pF 1,7; 0,06 - 0,6 mm)} \\ \text{poro - pequeno (1,7 - pF 2,7; 0,006 - 0,06 mm)} \end{array} \right.$
Poros - Finos	(2,7 - pF 4,2; 0,0002 - 0,006 mm)

Nesta classificação, o poro-muito-grande é considerado como canal do solo. No poro-grande, ocorre o movimento gravitacional da água, quase sem força capilar. Nos poros-médio e pequeno, o movimento gravitacional da água está sujeito à força gravitacional de baixo e alto grau, respectivamente. A água no poro-fino não pode se mover pela ação da força gravitacional.

Na mesma classificação, o macroporo atua na drenagem rápida durante chuvas de alta intensidade, contribuindo com o escoamento direto da água. O poro-médio é utilizado para infiltração e percolação vertical durante a chuva e alguns dias depois desta, contribuindo com o final do escoamento direto e com o início do escoamento base depois da chuva. O poro-pequeno é eficaz no armazenamento da água no solo. A água deste poro é fonte para a evapotranspiração na rizosfera e atua na descarga muito lenta na camada abaixo da rizosfera. A água no poro-fino se movimenta somente sob influência da evapotranspiração. O mesmo autor concluiu que a capacidade de armazenamento da água, que está diretamente associada com a recarga dos rios, depende somente dos poros-grosseiros, enfatizando que sua capacidade é controlada pela espessura das camadas do solo.

Assim, pode-se dizer que os solos possuem poros de vários tamanhos, de forma distribuída. CHILDS (1940) sugeriu o nome "curva característica de retenção de água" para a curva obtida pela relação entre umidade do solo e sucção. O volume da água retirada de

determinado volume de solo, para uma sucção específica, representa o volume do poro, de tamanho indicado por esta sucção (VOMOCIL, 1965).

A forma de diferencial desta curva mostra diretamente a distribuição do tamanho do poro. Nesta forma, diferencial, normalmente existe um pico que mostra seu valor máximo. A sucção que corresponde a este valor máximo conduz ao diâmetro equivalente do poro. COLLIS-GEORGE et al.(1971) definiram este diâmetro como tamanho médio do poro, que é o mais eficaz indicador da capacidade de armazenar água de um solo.

Tal relação entre o tamanho do poro e a capacidade de armazenamento de água, torna-se importante por esta representar a quantidade de água disponível para as plantas, fator que vem sendo discutido há muito tempo. VEIHMEYER e HENDRICKSON (1927 e 1949) definiram capacidade de campo (θ_c) como a quantidade de água retida pelo solo após a drenagem de seu excesso, quando a velocidade do movimento descendente praticamente cessa, o que usualmente ocorre dois a três dias após a chuva ou irrigação em solos permeáveis de estrutura e textura uniformes. Estes autores também definiram ponto de murcha permanente como o limite inferior de umidade (θ_r), no qual a reserva de água disponível do solo se esgotou, introduzindo o conceito de água disponível para a planta, como o valor de ($\theta_c - \theta_r$). Na área da hidrologia da água subterrânea, a porosidade, onde a água pode se movimentar, é definida como a porosidade efetiva (TODD, 1964; KAYANE, 1980). Neste sentido, a porosidade efetiva pode ser equivalente ao valor de ($\theta_s - \theta_r$).

SHINOMIYA (1993) demonstrou que o valor de θ_r depende do teor de silte e argila do solo, apresentando uma regressão linear.

O valor da sucção que fornece θ_c , pode estar na faixa de pF1,7 a pF2,5 (RUSSEL, 1973). O valor da sucção correspondente ao ponto de murcha permanente é normalmente pF4,2 (aproximadamente 15 bar) (HILLEL, 1980b).

Assumindo θ_s como umidade saturada, a água contida no solo entre θ_s e θ_c é definida como água gravitacional por REICHARDT (1987). A porosidade representada como $\theta_s - \theta_c$ é definida como porosidade drenável por HILLEL (1980b). Esta porosidade usualmente é ocupada por ar, fornecendo uma condição de aeração para as plantas. Segundo BAVER e FARNSWORTH (1940) e VOMOCIL e FLOCKER (1961), a aeração do solo tem um efeito prejudicial sobre o crescimento das plantas quando a porosidade ocupada por ar é menor do que 10 %. O milho exige valores mínimos de 12 a 15 %, e valores menores abaixo deste limite, persistindo por 3 a 5 dias, afetam drasticamente seu metabolismo (REICHARDT, 1987).

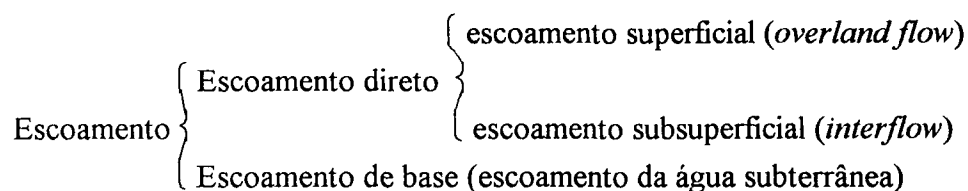
2.5 PROCESSO HIDROLÓGICO

2.5.1 Processo geral

Hidrologia é definida como a ciência que trata das águas da terra, sua ocorrência, circulação, distribuição, suas propriedades físicas e químicas e suas reações com o meio ambiente, incluindo sua relação com os seres vivos (CHOW, 1964). O estudo sobre o mecanismo de geração de vazão têm sido considerado como o assunto principal da hidrologia.

Após a década de 1960, principalmente hidrólogos florestais e geógrafos, continuaram o trabalho de medição em campo e descobriram vários mecanismos de movimento de água em bacias hidrográficas. Recentemente têm sido publicados alguns livros sobre o assunto baseados em novos conceitos (KIRKBY, 1978; DUNNE e LEOPOLD, 1978; TSUKAMOTO, 1992; etc.).

A vazão em bacia hidrográfica é normalmente expressa pelo hidrograma. O hidrograma é o resultado do comportamento hidrológico da bacia. Os componentes do hidrograma são classificados por KAYANE (1980), da seguinte forma:



HORTON (1931, 1933) apresentou um tipo de escoamento superficial (*Hortonian overland flow*) que ocorre quando a intensidade da chuva fica maior do que a infiltrabilidade do solo superficial. Seu conceito em que o tipo de escoamento ocupa a maior parte do componente do escoamento direto, há muito tempo foi aceito. Além disso, este conceito influenciou definitivamente a análise de escoamento, ligando o conceito de hidrograma unitário proposto por SHERMAN (1932). Por isso, os trabalhos de Horton são considerados como o início da hidrologia moderna. Entretanto, o tipo de escoamento superficial de Horton é considerado atualmente como um fenômeno que ocorre em casos extremos, como por exemplo, em área árida e compactada.

HEWLETT (1961a, 1961b) apresentou o conceito de área variável de influência (*variable source area*), negando o conceito de escoamento superficial de Horton. BETSON (1964) concluiu que uma bacia hidrográfica inteira não contribui para o escoamento direto e sim somente uma parte da bacia; e que esta parte contribuinte pode ser expressa em função da profundidade do solo, precipitação total, umidade inicial e intensidade de chuva. O conceito de BETSON (1964) denomina-se de área parcial de influencia (*partial source area*).

Através da observação em campo, DUNNE e BLACK (1970a, 1970b) apresentaram outro tipo de escoamento superficial, ou seja, escoamento superficial saturado. Esse escoamento ocorre devido à chuva que cai no solo saturado. Eles concluíram que o *throughflow* saturado não contribuiu para o escoamento direto por causa de sua velocidade lenta. A conclusão foi sustentada pela simulação numérica de FREEZE (1972a, 1972b). Entretanto, HEWLETT e HIBBERT (1967) prestaram mais atenção sobre contribuição do *throughflow* do que o escoamento superficial, insistindo no fluxo de pistão.

As críticas negativas contra o escoamento superficial de Horton e Dunne foram contestadas por várias observações em campo (MOSLEY, 1979; YASUHARA, 1984; OHTA et al., 1983; etc.), mostrando que nem o tipo de Horton e nem o de Dunne ocorreram numa microbacia hidrográfica e que o papel do *throughflow* foi importante para o escoamento direto.

De qualquer maneira, todos os trabalhos sustentaram o conceito de área variável de influência, opondo-se ao conceito de HORTON (1931, 1933). Segundo HINO (1989), a área de influência (*source area*) é classificada para três tipos: área parcial, área variável com escoamento superficial e área variável com escoamento subsuperficial.

No aspecto do escoamento direto é necessário prestar atenção sobre a separação do escoamento para vários componentes. Como DUNNE (1978) apontou, os mecanismos de escoamento direto entre microbacia e bacia hidrográfica são diferentes e a maioria dos estudos sobre os processos de escoamento foram limitados para as microbacias. Portanto, nos estudos do mecanismo de escoamento sempre há necessidade de considerar o tamanho do objeto do estudo, ou seja, a bacia hidrográfica.

2.5.2 Influência da floresta

Quando o tipo de vegetação se altera, primeiro ocorre uma mudança de balanço de energia devido à mudança de albedo. Isso altera a radiação líquida. Depois, as mudanças de fluxos de calor latente e de calor sensível alteram o ambiente térmico na superfície, provocando uma mudança quantitativa de evapotranspiração, que resulta na mudança do escoamento de longo tempo.

No caso de perda do solo superficial com o desmatamento, ocorre o escoamento superficial, aumentando o escoamento direto e conseqüentemente modificando a forma do hidrograma. A mudança do tipo de vegetação altera a velocidade de decomposição do material orgânico superficial e a velocidade das reações químicas no solo, conduzindo a uma perda de solo, e conseqüentemente podendo alterar a qualidade da água dos rios, lagoas, e mares.

Segundo SUZUKI (1992), o valor de albedo aumenta na ordem de floresta, campo agrícola, e solo nú. A radiação de onda curta refletida, determinada por albedo e um aumento na radiação coincide com um aumento no albedo, ou seja, ela fica mínima na floresta e máxima no solo nú (BAUMGARTNER, 1967). O mesmo autor mostrou que o comportamento da radiação líquida foi inverso ao da radiação de onda curta refletida. Comparando vários trabalhos, HATTORI (1992) concluiu que uma floresta possui maior eficiência de transferir a energia absorvida para calor latente do que outras comunidades vegetais.

MURAI e IWASAKI (1975) demonstraram diferenças em infiltração devidas aos diferentes tipos de vegetação, sendo que seu valor foi máximo na área florestal e diminuiu em ordem de área desmatada, pastagem, e solo nú. Através da determinação do efeito da sucessão vegetal sobre a infiltração na Pensilvânia, foi observado que a taxa de infiltração foi tanto maior quanto maior a cobertura florestal (LULL, 1964).

SWANK e CROSSLEY (1988) revisaram os trabalhos feitos na Estação Experimental em Coweeta, EUA, observando que (1) no caso de ocorrência de invasão vegetal depois de desmatamento, o escoamento anual total aumentou em 360 mm no ano do desmatamento e mostrou recessão exponencial, e mesmo após 20 anos o escoamento anual foi maior do que antes do desmatamento, e (2) o escoamento anual diminuiu em cerca de 300 mm após 20 anos de reflorestamento com coníferas depois de retirada de floresta latifoliada.

Calculando muitos dos dados obtidos em estações experimentais florestais do mundo inteiro, BOSCH e HEWLETT (1982) mostraram que (1) no ano do desmatamento o escoamento total anual aumentou proporcionalmente à taxa da área desmatada, (2) este aumento foi maior em área de floresta conífera do que em área de floresta latifoliada, e esta apresentou um aumento maior do que a área de cerrado, e (3) o escoamento total anual aumentou com o aumento da precipitação anual.

As curvas de recessão de escoamento são diferentes entre verão e inverno. Isso, devido à transpiração das árvores. Este fato foi observado a campo por TSUKAMOTO (1966) e FEDERER (1973), e com simulação numérica por SUZUKI (1984) e OHTA e KIDO (1986).

TROENDLE (1970) mostrou que as perdas de água do solo na área florestal foram significativamente maiores do que na área do solo nú na região dos Apalaches, EUA. FLETCHER e LULL (1963) mostraram que o solo na área florestal apresentou maior déficit de água do que o na área de menor vegetação, concluindo que estes resultados são devidos à grande evapotranspiração da floresta.

Segundo HEWLETT e HELVEY (1970), em Coweeta, o escoamento direto aumentou em 11 % depois que árvores derrubadas foram deixadas no mesmo lugar como cobertura vegetal, e não foi encontrada significância estatística de aumento do pico do hidrograma.

Em região de granito, em área reflorestada, ocorre um hidrograma suave com pico baixo, enquanto que em área sem floresta o hidrograma apresenta um pico bastante acentuado. Este fenômeno foi demonstrado a campo por FUKUSHIMA (1977) e com simulação numérica por FUKUSHIMA (1987).

Revisando os dados obtidos no Japão, NAKANO (1971) mostrou que depois do desmatamento, o escoamento direto aumentou em 1,5 a 2 vezes e o pico aumentou em 30 a 100 %.

Comportamentos do escoamento direto devido ao desmatamento se diferenciam entre áreas que apresentam altas e baixas precipitações. Na área chuvosa, o desmatamento reduz a evapotranspiração, aumenta a umidade do solo, e como consequência aumenta o escoamento direto. Entretanto, na área menos chuvosa, o solo usualmente seca-se depois do desmatamento e no caso de precipitação menos que 100 mm, o escoamento direto diminui sob condição de pouca umidade do solo antes da chuva (NAKANO, 1976).

Usando o método de simulação numérica, OGAWA (1983) mostrou que o pico do hidrograma ficou maior e foi atingido em um menor tempo na área urbana sem vegetação, ocorrendo o contrário na área florestal.

Na Estação Experimental de Hubbard Brook, as concentrações de K, Ca, e $\text{NO}_3\text{-N}$ da água no rio aumentaram abruptamente após o desmatamento e aplicação de herbicida. Depois de cessado o uso de herbicida, a vegetação novamente começou a invadir a terra e as concentrações elevadas voltaram aos valores anteriores ao desmatamento (LIKENS et al., 1977 e 1978).

2.6 MODELAGEM NUMÉRICA

Foi KLUTE (1952) que primeiramente empregou o método de diferenças finitas para resolver o problema de fluxo unidimensional, horizontal e não saturado. Após, vários modelos de simulação numérica têm sido propostos. FREEZE (1969) e OHNISHI e NISHIGAKI (1981) apresentaram uma lista de trabalhos de simulação numérica que utilizaram a teoria de fluxo saturado e não saturado.

FREEZE (1971) desenvolveu o modelo de diferenças finitas tridimensional, tratando o fluxo saturado e não saturado em microbacias não homogêneas e anisotrópicas.

FREEZE (1972a, 1972b) completou um modelo numérico unidimensional e transiente de infiltração e escoamento. Os resultados deste autor sustentaram e esclareceram o

mecanismo do novo conceito de área variável de influência no processo de geração do fluxo subsuperficial rápido, que foi proposto por HEWLETT (1961a, 1961b) e BETSON (1964).

NEUMAN (1973) usou o método de elementos finitos (um tipo interativo de Galerkin) para resolver as equações do fluxo transiente num meio poroso saturado e não saturado.

Os resultados, através do modelo bidimensional com o método de elementos finitos de OKA (1983), são de caráter genérico e têm sido observados em outros trabalhos nas observações a campo e nas simulações numéricas depois de 1983.

Na última década, a modelagem numérica tem sido desenvolvida em ritmo acelerado. Os modelos têm se aproximado mais da realidade com mais conhecimentos dos processos físicos e alta técnica de computação. SUNADA e HONG (1988) e TAKASAO e SHIIBA (1988) desenvolveram o método de onda cinemática, considerando os efeitos de formas de rampa. WATANABE (1988) aplicou o método de elementos finitos para uma bacia hidrográfica real e obteve um bom ajuste entre os dados observados e calculados.

As simulações numéricas tratam do fluxo unidimensional, bidimensional e tridimensional com o método de diferenças finitas e o de elementos finitos, entre outros.

Embora o fluxo vertical unidimensional não possa representar situações reais do campo, o modelo unidimensional é a primeira fase para quantitativamente testar as propriedades do fluxo (NISHIGAKI, 1983). Além disso, a análise unidimensional tem desempenhado um importante papel de examinar as propriedades hidráulicas fundamentais do solo e de fazer uma verificação básica ao fim da análise multidimensional.

OHTA et al. (1983) demonstraram que hidrogramas observados a campo, podem ser explicados por um modelo que considerou o processo de infiltração como um fluxo unidimensional, transiente, e saturado e não saturado. Com uma análise numérica, TANI (1985) também mostrou que as propriedades da vazão de uma coluna concordaram aproximadamente com as do escoamento de uma microbacia hidrográfica montanhosa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

3.1.1 Bracatinga

As mudas utilizadas foram as de bracatinga argentina (*Mimosa scabrella* var. *aspericarpa*) que foram semeadas no dia 19 de julho de 1993 em sacos plásticos. As referidas mudas foram cedidas pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP).

3.1.2 Minhoca

As minhocas foram coletadas na Estação Experimental do Canguiri da Universidade Federal do Paraná e no Horto Municipal do Barreirinha da Prefeitura Municipal de Curitiba. As minhocas coletadas foram minhocas loucas (*Amyntas* spp. Rosa, 1891) com tamanho de 10 a 15 cm.

3.1.3 Viveiro

O viveiro do experimento foi instalado no campus do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. O referido campus está localizado na cidade de Curitiba, no Estado do Paraná, à latitude de 25° S; longitude de 49° W e altitude de 906 m.

O relevo da área experimental usada é plano.

O viveiro foi instalado sobre um solo classificado ao nível de grande grupo como Cambissolo. A Tabela 3.1 apresenta algumas características físicas e químicas do solo. A granulometria e a textura do solo foram sujeitas a EMBRAPA-SNLCS (1979b). Este solo possui drenagem moderada, profundidade de 60 cm e fertilidade média a alta.

O clima do local é classificado pelo sistema de Köeppen como do tipo Cfb, isto é pluvial, temperado-fresco subtropical, sempre úmido e com chuvas todo o ano. A temperatura média anual é 16,5° C A temperatura média do mês quente é inferior a 22° C e a do mês mais frio é superior a 10° C com possibilidade de mais de 5 geadas por ano. A precipitação média anual é superior a 1400 mm, regularmente distribuídas (MAACK, 1968).

3.2 MÉTODOS DE TRABALHO NO VIVEIRO

Tabela 3.1 Características físico-químicas do solo da área experimental antes da instalação do experimento, Curitiba, 1993. (a) granulometria e (b) composição química.

(a)

Horizonte	argila (%)	silte (%)	areia (%)	textura
A (0-30cm)	40	14	46	argilosa
B (30-60cm)	56	34	10	argilosa

(b)

Horizonte	pH	Al ⁺³	H ⁺ +Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	T	C	P	V	m
	(CaCl ₂)		(meq/100 cm ³ solo)					(%)	(ppm)	(%)	(%)
A (0-30cm)	5,1	0,0	9,3	8,4	4,0	0,56	22,3	6,1	7,0	58,2	0
B (30-60cm)	4,5	4,7	13,1	6,1	2,4	0,16	21,8	0,4	1,0	39,8	35,2

3.2.1 Delineamento experimental e tratamentos

Os 4 tratamentos foram dispostos em blocos ao acaso, com 4 repetições para observar a influência da minhoca sobre o crescimento da bracatinga, e com 3 repetições para observar a influência sobre as propriedades hidráulicas do solo. A dimensão da parcela para aquela observação foi 1,5 m X 1,8 m e a dimensão para esta foi 1,0 m X 1,5 m. Os tratamentos foram: i) 0 unidade de minhoca/m² (Tratamento 00); ii) 30 unidades/m² (Tratamento 30); iii) 60 unidades/m² (Tratamento 60); iv) 90 unidades (Tratamento 90). Todos os tratamentos foram distribuídos ao acaso em cada um dos blocos (Figura 3.1).

Os dados obtidos foram analisados pela análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Duncan ao nível de 5 % de probabilidade.

3.2.2 Instalação do experimento

3.2.2.1 Preparo da área

A área experimental foi capinada na última semana de março de 1993. Para separar os tratamentos, foram feitas trincheiras com 20 cm de largura e 50 cm de profundidade na divisa dos tratamentos. Após isto, foi colocado um plástico na trincheira e preso em cada canto por uma estaca, a fim de suportar o plástico tensionado. A trincheira foi fechada com o mesmo solo. O plástico foi usado para evitar que minhocas ultrapassassem para outro tratamento e sua dimensão foi de 50 cm acima da superfície e 50 cm abaixo dela (Figura 3.2).

No dia 30 de abril e dia 6 de maio, foi aplicado Formol (0,5%) com 3,5 l/m² em todas as parcelas para tirar todas minhocas que viveram nas mesmas.

No dia 7 de maio, foi colocado esterco de ovino, cuja composição química, mostrada na Tabela 3.2, na quantia de 1,31 Kg/m² (massa seca) e foi recoberto com o capim cuja massa seca foi 924 g/m².

3.2.2.2 Aplicação das minhocas

Depois da coleta das minhocas na Estação Experimental do Canguiri e no Horto Municipal da Barreirinha, elas foram imediatamente colocadas em cima de cada parcela em número de 0, 30, 60 e 90 unidades /m², conforme os tratamentos, nos dias 13 e 14 de maio de 1993.

3.2.2.3 Plantio das mudas

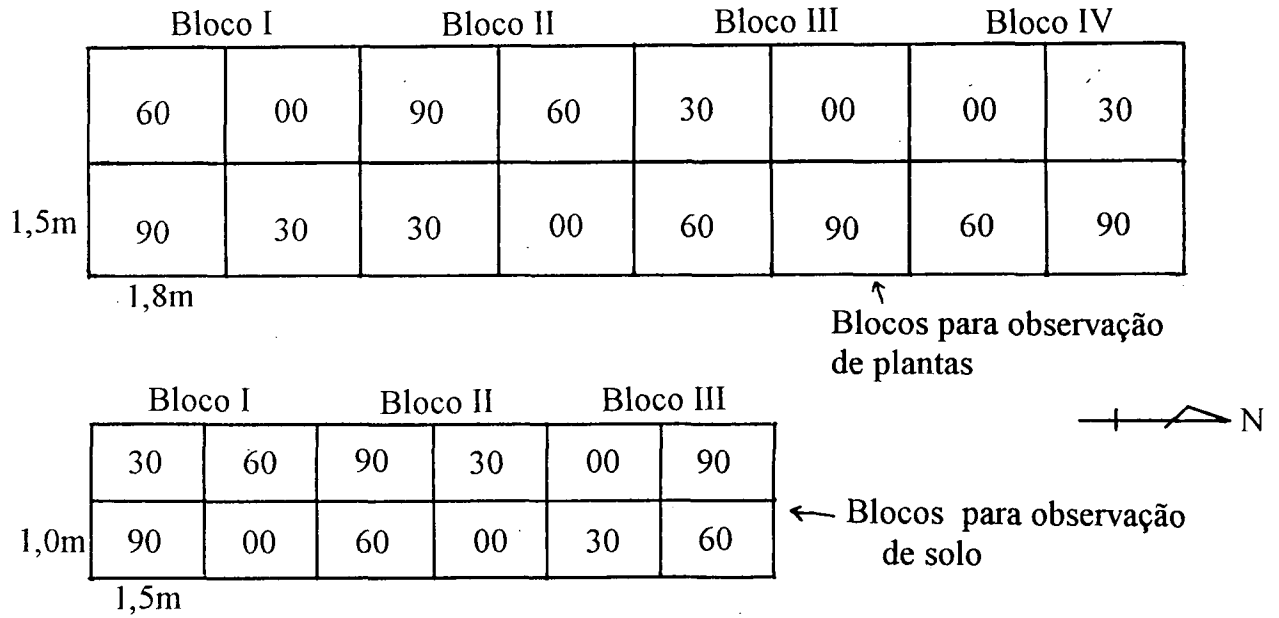


Figura 3.1 Esquema da distribuição dos blocos experimentais.

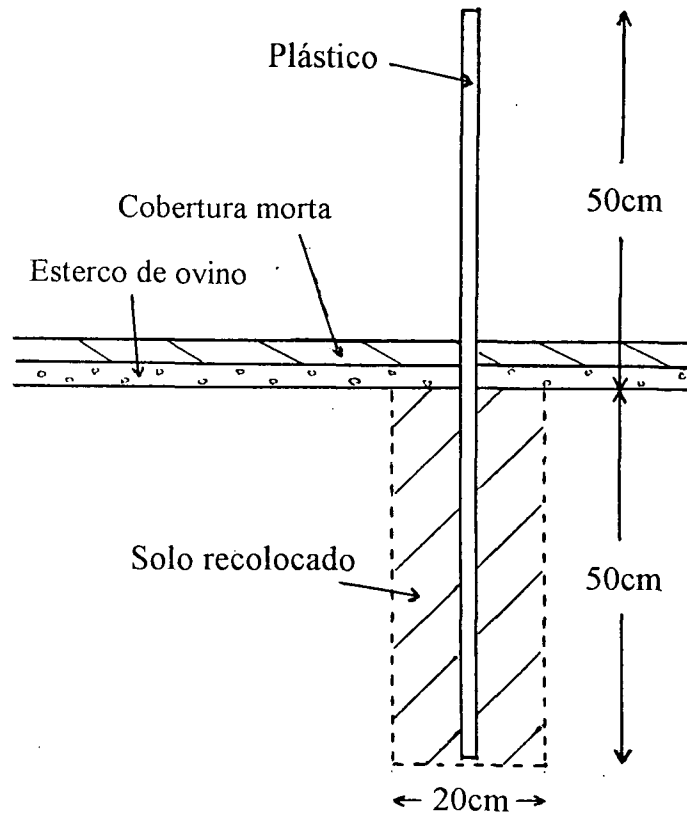


Figura 3.2 Perfil de uma parte do experimento a campo.

Tabela 3.2 Características químicas do esterco de ovino, Curitiba, 1993.

pH	Al ⁺³	H ⁺ +Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	T	C	P	V	m
(CaCl ₂)	(meq/100 cm ³ solo)						(%)	(ppm)	(%)	(%)
7,7	0	0	5,8	11,5	3,36	20,7	12,5	97,5	0	0

As mudas de bracatinga foram produzidas no Viveiro de Produção de Mudas Florestais do Guatupê - IAP. Com dois meses de idade foram levadas à área experimental e apresentavam um altura de 11 a 14 cm (média de 12,3 cm).

Nos dias 28 e 29 de setembro de 1993, foram preparadas as covas de 13 cm de profundidade por 6 cm de diâmetro. Nessa mesma data, foram plantadas as mudas e receberam água para evitar mortalidade por causa do plantio.

O espaçamento usado foi 30 X 30 cm, utilizando 20 plantas de bracatinga por parcela experimental (Figura 3.3).

3.2.3 Cuidados no viveiro

Cerca de 1 vez a cada duas semanas foi executado manualmente o arranque do mato nas 28 parcelas experimentais. O mato arrancado foi deixado na mesma parcela.

Foi fornecida água para as bracatingas nas datas do plantio das mudas (28 e 29 de setembro de 1993). Após isso, não foi fornecida água artificialmente em nenhum outro dia.

3.2.4 Cronograma de medição a campo

A precipitação foi medida diariamente ao meio-dia com o pluviômetro instalado 100 m. ao sul do viveiro e a 1,5 m de altura do solo, até o final de fevereiro de 1994.

Depois do plantio das mudas, foi realizada medição de altura de todas as plantas cada 30 dias, até fevereiro de 1994. Essa medição foi feita a partir do nível do solo até o ápice das plantas, usando uma régua graduada com aproximação ao centímetro.

No último dia desta medição, as plantas foram seccionadas à superfície do solo e a parte aérea foi colocada em estufa à temperatura de 70°C por 4 dias para sua secagem. Após a secagem, esta foi separada manualmente em folhas e caules, e foram medidas suas respectivas massas.

3.2.5 Coletas das amostras de solos

No mês de fevereiro de 1994, amostras do solo foram coletadas verticalmente com cilindros de metal com capacidade de 100 cm³ de volume e 4 cm de altura para fim de medição da condutividade hidráulica saturada e da curva característica de água. Todas as amostras foram tiradas sem perturbação, como amostra de terra indeformada, nas profundidades de 5, 15, 25 e 35 cm no centro de cada parcela onde não havia plantas de bracatinga.

3.3 MÉTODOS DE TRABALHO EM LABORATÓRIO

3.3.1 Condutividade hidráulica saturada

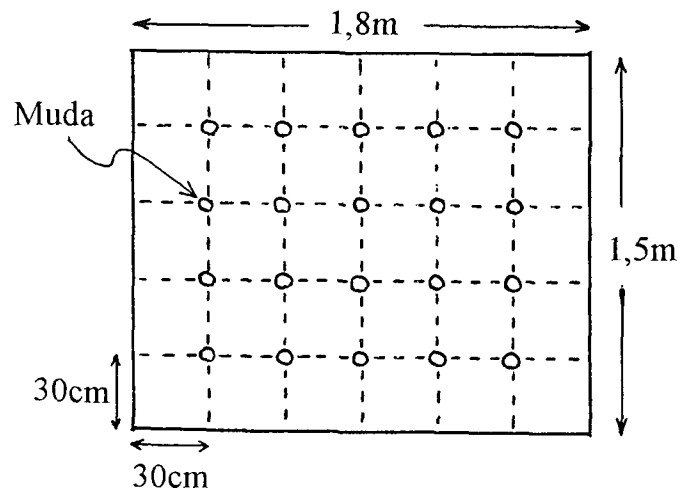


Figura 3.3 Plantio das Mudas de Bracatinga na parcela.

O valor da K_s do solo pode ser determinado através da Lei de Darcy, ou seja:

$$q = -K_s \frac{d\phi}{dz} \quad (1)$$

onde q é densidade de fluxo, K_s é condutividade hidráulica saturada, ϕ é carga hidráulica e z é distância.

Neste estudo aplicou-se esta lei diretamente à medição do valor de K_s das amostras indeformadas de 100 cm^3 referenciando KLUTE (1986). O método de carga constante foi utilizado.

Para cada amostra, a medição foi executada três vezes e sua média foi calculada na unidade de cm/s .

3.3.2 Retenção de água (curva característica de água)

A metodologia de determinação de retenção de água consiste em dois tipos: (1) método de sucção e (2) método de pressão (KLUTE, 1986). Neste estudo utilizou-se o método de mesa de tensão (método de sucção) até, que o valor de sucção chegasse a 50 cm de água. Após, a câmara de Richards foi utilizada para executar o método de pressão até $\psi = -15380 \text{ cm}$ de tensão. O método de mesa de tensão e o da câmara de Richards são descritos por KIEHL (1979), KLUTE (1986) e EMBRAPA-SNLCS (1979a).

Neste estudo, a umidade do solo foi medida para tensões de 0, -4, -7, -10, -20, -30, -50, -100, -316, -1000, e -15380 cm de H_2O , no processo de drenagem, sem consideração de histereses.

3.4 MÉTODOS DE TRABALHO EM ANÁLISE TEÓRICA

3.4.1 Propriedades hidráulicas do solo

Usando a teoria de MUALEM (1976), VAN GENUCHTEN (1980) propôs equações para exprimir as propriedades hidráulicas. Como suas equações não têm a descontinuidade na curva, que por vezes causa divergência rápida em análise numérica de movimento de água do solo, elas têm sido vastamente utilizadas. Portanto este estudo também as utilizou. Explicação matemática mais detalhada é encontrada no ANEXO desta tese.

A equação de Van Genuchten para retenção de água é

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\psi|)^n\right]^m} \quad (2)$$

onde θ_s é umidade saturada (cm^3/cm^3), θ_r é umidade residual (cm^3/cm^3), α , m e n são parâmetros de ajuste ($m = 1 - 1/n$).

Com os dados obtidos pelo experimento laboratorial (seção 3.3.2) de retenção de água, os parâmetros da Eq. (2) são obtidos através de regressão, minimizando a soma dos quadrados dos desvios. Este processo produz os valores dos parâmetros da Eq. (2), isto é, θ_s , θ_r , α , m , e n .

A condutividade hidráulica saturada, K_s , não é função de ψ , e pode ser diretamente obtida pelo experimento laboratorial (seção 3.3.1).

A condutividade hidráulica geral, incluindo K_s e condutividade hidráulica não saturada é dada como função de ψ , e explicada pela seguinte equação:

$$K(\psi) = K_s \frac{\left\{ 1 - (\alpha |\psi|)^{n-1} \left[1 + (\alpha |\psi|)^n \right]^{-m} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha |\psi|)^n \right]^{\frac{m}{2}}} \quad (3)$$

Os valores de α , m , e n obtidos pela Eq.(2) e o valor de K_s podem construir a Eq.(3). Então, pode-se dizer que $K(\psi)$ é obtida indiretamente, usando o método proposto por VAN GENUCHTEN (1980).

3.4.2 Sistema de poros do solo

Através do uso da Eq. (2), foi executada uma análise da estrutura dos poros. Aqui o valor de θ , correspondente ao valor de ψ (pF) é designado convencionalmente como θ_ψ . Por exemplo, no caso que $|\psi| = 1\text{cm} = \text{pF } 0$ e $|\psi| = 3\text{cm} = \text{pF } 0,48$, os valores de θ são notados como θ_0 e $\theta_{0,48}$, respectivamente.

Com os resultados obtidos pela aplicação da Eq. (2) para as amostras, os parâmetros de retenção de água do solo para os quatro tratamentos foram determinados estatisticamente em quatro diferentes profundidades (5, 15, 25 e 35 cm).

A partir da teoria de Laplace, pode-se determinar a ascensão capilar, h , com a seguinte forma:

$$h = \frac{2 \sigma \cos \alpha}{g \rho r} \quad (4)$$

onde σ é tensão superficial, α é ângulo de contato, g é aceleração gravitacional, ρ é densidade da água e r é raio do capilar.

Assumindo que $\sigma = 73,5$ (dyn/cm), $\rho = 1$ (g/cm³), $g = 980$ (cm/s²), $\alpha = 0^\circ$, obtém-se

$$h = \frac{0,3}{2 r} = \frac{0,3}{d} \quad (5)$$

onde d é o diâmetro equivalente do poro (cm). Neste caso pode-se considerar que h é sucção da água em altura (cm). Usando a Eq. (5), obtém-se a Tabela 3.3 que mostra a relação entre diâmetro equivalente do poro e sucção.

Usando a Eq. (2) e os parâmetros determinados, os valores de θ_0 , $\theta_{0,48}$, $\theta_{0,7}$, $\theta_{1,7}$, $\theta_{2,7}$, $\theta_{4,2}$, foram calculados. Introduzindo a classificação de TAKESHITA (1985), foram calculadas as quantidades de macroporos, poros-grosseiros e poros-finos.

Diferenciando a Eq. (2), obtém-se uma relação entre capacidade específica da água C e ψ com a seguinte forma:

$$C(\psi) = \frac{-m n \alpha^n (\theta_s - \theta_r) (|\psi|)^{n-1}}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^{m+1}} \quad (6)$$

Tabela 3.3 Relação entre sucção da água do solo (h) e o diâmetro equivalente do poro (d).

h	(cm)	1	3	5	50	501	15340
	(pF)	0	0,48	0,7	1,7	2,7	4,2
d	(mm)	3	1	0,6	0,06	0,006	0,0002

A curva expressa pela Eq. (6) demonstra a distribuição de poros no solo. Usando os parâmetros obtidos através da Eq. (2), esta distribuição foi determinada para cada solo. Através da distribuição foi determinado o valor de $\psi_{MÁX}$ que fornece o máximo valor de $C(\psi)$. Então, matematicamente, tem-se:

$$\frac{d C(\psi_{MÁX})}{d\psi} = \frac{d^2\theta(\psi_{MÁX})}{d\psi} = 0 \quad (7)$$

ou seja

$$\frac{\left[m n (\theta_s - \theta_r) \alpha^n \left| \psi_{MÁX} \right|^{n-1} \right] \left[1 + \left(\alpha \left| \psi_{MÁX} \right| \right)^n \right]^{m+1} - m n (\theta_s - \theta_r) \alpha^n \left| \psi_{MÁX} \right|^{n-1} \left\{ \left[1 + \left(\alpha \left| \psi_{MÁX} \right| \right)^n \right]^{m+1} \right\}'}{\left\{ \left[1 + \left(\alpha \left| \psi_{MÁX} \right| \right)^n \right]^{m+1} \right\}^2} = 0 \quad (8)$$

Simplificando a Eq. (8), obtém-se finalmente,

$$\left| \psi_{MÁX} \right| = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

Assim, o valor de $\psi_{MÁX}$ de cada solo pode ser determinado com sua curva característica de retenção de água. Desde que $\psi_{MÁX}$ é o valor que define o tamanho (diâmetro) médio do poro, definido por COLLIS-GEORGE et al. (1971), então inserindo a Eq. (9) na Eq. (5), obtém-se:

$$D_M = \frac{0,3}{\frac{1}{\alpha} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (10)$$

onde D_M é tamanho médio do poro.

3.4.3 Equação que governa a densidade de fluxo da água no solo

A Figura 3.4 mostra o fluxo da água que entra e sai de um elemento do solo em forma de um paralelepípedo dentro de um espaço definido por um conjunto de coordenadas retangulares x , y e z . Os lados do elemento são em comprimento Δx , Δy e Δz . Seu volume, $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$. É assumido que a água é um líquido incompressível e que o elemento não possui nem *source* nem *sink*. Primeiro é considerado somente o fluxo líquido na direção de x , então a descarga através das faces esquerda e direita é o produto do fluxo pela área $\Delta y \cdot \Delta z$, da face onde o fluxo passa. A face direita difere da esquerda de uma quantidade $\frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x$. Portanto, a taxa de descarga líquida na direção x fica:

$$\left[q_x - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x \right) \right] \Delta y \Delta z = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (11)$$

Uma análise semelhante pode ser aplicada para as direções y e z . Então, a forma tridimensional da carga líquida é:

$$- \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (12)$$

onde q_x , q_y e q_z são fluxos nas direções x , y e z , respectivamente.

Por outro lado, a taxa de variação do volume de água no elemento, por unidade de tempo, é $\frac{\partial \theta}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z$, onde θ é a umidade volumétrica do solo.

Baseado no princípio de conservação da matéria, a taxa da alteração do volume de água no tempo deve ser igual à mudança da carga volumétrica, ou seja:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (13)$$

ou,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) = - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (14)$$

onde $\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z)$. Esta equação é chamada equação da continuidade.

Aqui, é considerada a equação do movimento. A lei de Darcy foi originalmente válida somente para o fluxo saturado. Esta lei é expressa à seguir:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla \phi \quad (15)$$

onde \mathbf{K} é condutividade hidráulica saturada em forma tridimensional e ϕ é a carga hidráulica que é a soma de carga de pressão (ψ) e carga gravitacional (Z). BUCKINGHAM (1907) estendeu a lei para o fluxo não saturado como:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K}(\psi) \cdot \nabla \phi \quad (16)$$

onde $\mathbf{K}(\psi)$ é condutividade hidráulica não saturada em forma funcional de carga de pressão. Substituindo a Eq. (16) na Eq. (14), e considerando que a direção para cima é positiva, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \nabla(\mathbf{K}(\psi) \nabla \phi) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

Esta equação é chamada Equação de RICHARDS (1931). No caso de sistema unidimensional vertical, a Eq. (17) se torna:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (18)$$

Assumindo a função $\theta = \theta(\psi, t)$ contínua e derivável, a Eq. (17) pode ser expressa por:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (19)$$

onde $C(\psi) = d\theta / d\psi$ é a capacidade específica da água.

Desde que a Eq. (19) é altamente não-linear, torna-se difícil achar sua solução analítica. Por isso, a análise numérica é normalmente utilizada. As relações entre K e ψ , e entre θ e ψ são geralmente requisitadas antes de que qualquer teoria de fluxo de água seja aplicada na prática.

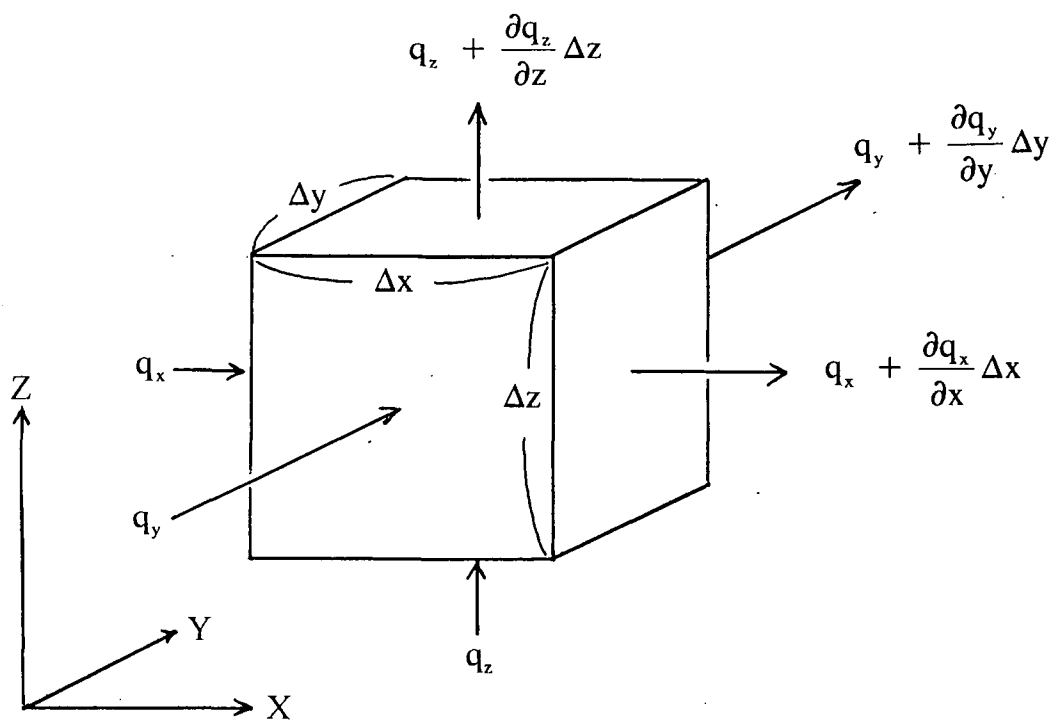


Figura 3.4 Continuidade do fluxo num paralelepípedo.

3.4.4 Método de diferenças finitas

O solo sobre o lençol freático é geralmente não saturado, e o movimento da água no mesmo é apresentado pela equação diferencial parcial parabólica em segunda ordem (uma equação de difusão). Além disso, como a condutividade hidráulica e a capacidade específica da água são funções da carga de pressão, esta equação é altamente não-linear.

No caso de fluxo unidimensional e vertical, a equação de continuidade é expressa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (20)$$

onde z é a profundidade (local) orientada positivamente para baixo, t é o tempo, θ é umidade (função da carga de pressão), e q é o fluxo de água. O sinal negativo indica que a variação da umidade com o tempo é inversa à variação do fluxo com a profundidade.

A carga de pressão é negativa no solo não saturado, e o valor absoluto da carga negativa de pressão é chamado sucção. Embora possa haver histereses entre θ e ψ , o presente estudo assume que eles constituem uma única função. Então, a Eq. (20) pode ser explicitada como:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (21)$$

Por outro lado, a equação de Buckingham é dada no presente modelo por:

$$q = - K(\psi) \frac{\partial (\psi - z)}{\partial z} = - K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\psi) \quad (22)$$

onde $K(\psi)$ é condutividade hidráulica (função da carga de pressão).

Substituindo a Eq. (22) para a Eq. (21),

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} - K(\psi) \right] \quad (23)$$

Esta equação diferencial parcial é extremamente complexa para ser resolvida analiticamente. Uma alternativa, neste caso, é o emprego de métodos numéricos.

Embora a equação diferencial parcial seja função contínua, o domínio das variáveis independentes deve ser discretizado através do uso de nós finitos para análises numérica. Então, todos desconhecidos podem ser determinados somente nos nós discretizados.

No domínio, cada parte entre dois nós é chamada elemento (Figura 3.5). Os desconhecidos, ψ e θ , existem somente nos nós. Assume-se que as funções $K(\psi)$ e $C(\psi)$ são homogêneas dentro de cada elemento. O subscrito i indica nó I e elemento I , ou seja, ψ_i é o valor de ψ no nó I e K_i é o valor de K dentro do elemento I .

De acordo com a Eq. (22), o fluxo (positivo para baixo) dentro do elemento I é:

$$q_i = -\frac{K_i}{L_i}(\psi_{i+1} - \psi_i) + K_i = -T_i(\psi_{i+1} - \psi_i) + K_i \quad (24)$$

onde L_i é comprimento do elemento e $T_i = K_i/L_i$.

A seguir, considera-se o balanço hídrico no nó I correspondente à Eq. (20). A diferença entre o fluxo q_i dentro do elemento I e o fluxo q_{i-1} dentro do elemento $I-1$ indica a mudança de armazenamento por unidade de tempo no nó I . Além disso, esta diferença conduz a mudança da carga de pressão no nó I . De acordo com a Eq. (21), portanto, obtém-se:

$$\frac{\overline{C_{i-1}} \cdot L_{i-1} + \overline{C_i} \cdot L_i}{2} \cdot \frac{\psi_i^{j+1} - \psi_i^j}{\Delta t} = -(\overline{q_i} - \overline{q_{i-1}}) \quad (25)$$

onde ψ^j e ψ^{j+1} são cargas de pressão nos tempos j e $j+1$, respectivamente. A diferença entre o tempo j e o tempo $j+1$ é Δt (Figura 3.6). Aqui, $\overline{C_i}$ e $\overline{q_i}$ indicam médias ponderadas da aproximação da diferença central das variáveis C_i e q_i nos tempos j e $j+1$, e são dadas por

$$\left. \begin{aligned} \overline{C_i} &= (1 - \lambda) C_i^j + \lambda C_i^{j+1} \\ \overline{q_i} &= (1 - \lambda) q_i^j + \lambda q_i^{j+1} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

onde λ é o fator de ponderação entre 0 e 1.

Substituindo a Eq. (24) à Eq. (25),

$$\begin{aligned} & \frac{\overline{C_{i-1}} \cdot L_{i-1} + \overline{C_i} \cdot L_i}{2} \cdot \frac{\Psi_i^{j+1} - \Psi_i^j}{\Delta t} \\ &= -(\overline{\Psi_i} - \overline{\Psi_{i-1}}) \cdot \frac{\overline{K_{i-1}}}{L_{i-1}} + \overline{K_{i-1}} + (\overline{\Psi_{i+1}} - \overline{\Psi_i}) \cdot \frac{\overline{K_i}}{L_i} - \overline{K_i} \end{aligned} \quad (27)$$

Definindo que $C_i L_i = C L_i$ e $K_i/L_i = T_i$, a Eq. (27) muda para:

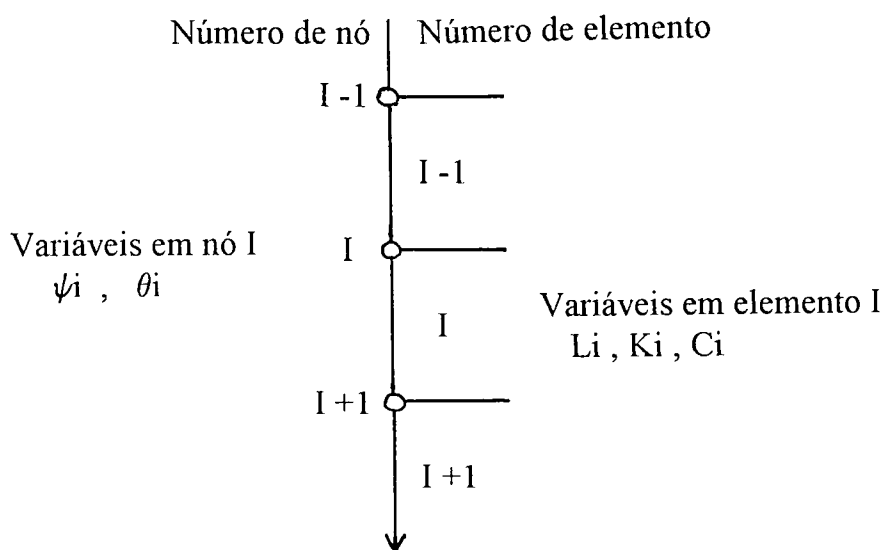


Figura 3.5 Discretização da coluna do solo.

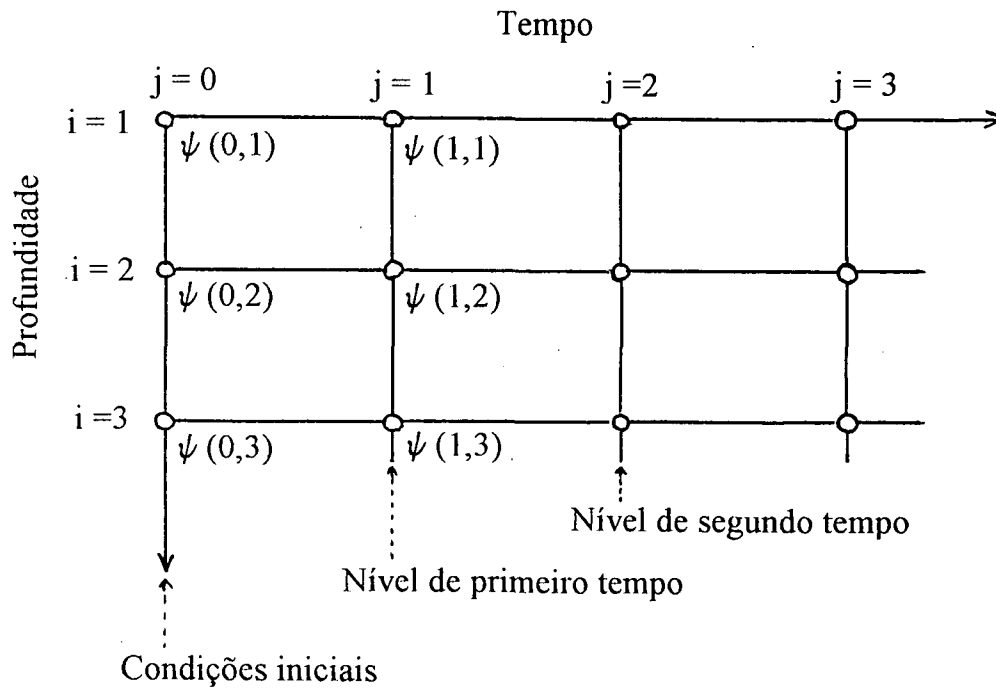


Figura 3.6 Grade computacional para equação de fluxo uni-dimensional.

Resolvendo esta matriz de baixo para cima, a Eq. (32) pode ser resolvida como:

$$\begin{aligned} \psi(N) &= D(N)' \\ \psi(I) &= D(I)' - C(I)' \cdot \psi(I+1) \quad (I = N-1, \dots, 1) \end{aligned} \quad (34)$$

Esta equação dá a solução (aproximação) nos nós interiores no tempo $j+1$. Depois de calcular estes valores, o objeto do cálculo muda para o próximo tempo e um novo sistema de equações é resolvido.

3.4.5 Descrição dos modelos completos empregados para análise

A condição de contorno no extremo mais alto é que houve precipitação mas não evapotranspiração. A mesma no extremo mais baixo é que a carga de pressão é constante e coincidente com 0 (zero).

A condição inicial é que a distribuição vertical das cargas de pressão cria um estado estático da água do solo, ou seja, o gradiente hidráulico é zero em todas as partes da coluna de solo.

Para executar o cálculo numérico, intervalos de tempo e de distância foram determinados com 10 segundos e 1 cm, respectivamente. O tempo calculado para cada caso foi de 40 horas.

Neste estudo, o modelo considerou que o solo possui uma taxa de infiltração suficiente para não haver o escoamento superficial. No modelo, a água sai da parte inferior da coluna do solo sem aumentar o nível do lençol freático, e o fluxo da água forma o *throughflow*, ou seja o fluxo da água subsuperficial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONDIÇÃO PLUVIOMÉTRICA

A Tabela 4.1 mostra a precipitação mensal durante o período experimental de abril de 1993 a fevereiro de 1994. Durante este período, os meses de agosto e setembro apresentaram tempo seco e tempo extremamente chuvoso, respectivamente.

4.2 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SOLO

As amostras coletadas na parcela da primeira repetição (Bloco I) e do Tratamento 00 (com 0 minhocas/ m²) em profundidade de 5, 15, 25 e 35 cm são designadas como I00-5, I00-15, I00-25 e I00-35, respectivamente. A Tabela 4.2 mostra todos os dados dos parâmetros das propriedades hidráulicas de cada amostra.

O valor de K_s foi determinado como o valor médio de três repetições. Os parâmetros para a curva característica de retenção de água, ou seja α , n, θ_s e θ_r , foram determinados através da aplicação da Eq.(2) para os dados obtidos em experimento laboratorial, realizado uma vez para cada amostra. Como os valores de coeficiente de determinação (c.d.) são bem altos, pode-se afirmar que a aplicação da Eq.(2) apresenta as características de retenção de água de todas as amostras.

A análise de variância foi aplicada para todos os valores de K_s, α , n, θ_s e θ_r , demonstrados na Tabela 4.2, entre os quatro tratamentos. Foi encontrada significância estatística ($p \leq 0,05$), somente em casos de α na profundidade de 5 cm, θ_s de 5 cm e θ_s de 15 cm. Nos outros casos, não se obteve diferença significativa.

A Tabela 4.3 mostra os resultados do teste de Duncan, ao nível de 5% de probabilidade, sobre os dados da Tabela 4.2. Diferença significativa foi encontrada somente em casos de α e θ_s de 5 cm, α e θ_s de 15 cm e θ_s de 25 cm. Embora não se tenha obtido diferença significativa de K_s entre os quatro tratamentos, existe forte tendência de que o valor de K_s aumente bastante com o aumento da população das minhocas até 25 cm de profundidade. Além disto, em geral, há tendência de maior influência das minhocas sobre as propriedades hidráulicas do solo quanto menor a profundidade. As tendências indicam também não ocorrer modificação das propriedades na profundidade de 35 cm. Estes fatos sugerem que a espécie de minhoca utilizada neste estudo vive até 30 cm de profundidade e que sua intensidade de atividade diminui com a profundidade.

Os valores de todos os parâmetros da Tabela 4.3 são apresentados na Tabela 4.4, distribuídos conforme os tratamentos, e estes distribuídos em profundidades. Tais valores dos parâmetros, são expressos em forma gráfica mostrando as variações causadas pela

Tabela 4.1 Precipitação (mm) durante o período experimental no Setor de Ciências Agrárias da UFPR, Curitiba, 1993/94.

	1993							1994		
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
Total (mês)	191,5	91,5	66,0	28,5	410,0	161,5	164,0	143,8	260,5	145,0
média diária	6,2	3,1	2,5	0,9	13,7	5,2	5,5	4,6	8,4	5,6

Tabela 4.2 Parâmetros das propriedades hidráulicas do solo, com aplicação das equações de Van Genuchten (1980), Curitiba, 1994.

AMOSTRA *	K_s (cm/s)	α (1/cm)	n	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	c.d. **
I 00 - 5	$8,97 \times 10^{-3}$	0,062747	1,670068	0,617	0,242	0,984
I 00 - 15	$4,56 \times 10^{-3}$	0,079150	1,466196	0,564	0,270	0,992
I 00 - 25	$8,25 \times 10^{-4}$	0,088966	1,784896	0,600	0,253	0,998
I 00 - 35	$3,34 \times 10^{-5}$	0,087629	1,640226	0,552	0,277	0,987
I 30 - 5	$2,49 \times 10^{-2}$	0,127483	1,416839	0,639	0,263	0,984
I 30 - 15	$7,27 \times 10^{-3}$	0,095647	1,387969	0,625	0,285	0,986
I 30 - 25	$9,66 \times 10^{-3}$	0,109206	1,427300	0,645	0,259	0,992
I 30 - 35	$8,10 \times 10^{-5}$	0,113621	1,414426	0,573	0,302	0,989
I 60 - 5	$1,45 \times 10^{-2}$	0,120916	1,753793	0,687	0,268	0,979
I 60 - 15	$1,88 \times 10^{-2}$	0,078384	1,602912	0,731	0,275	0,995
I 60 - 25	$8,19 \times 10^{-3}$	0,107639	1,510369	0,645	0,234	0,990
I 60 - 35	$4,72 \times 10^{-5}$	0,089425	1,574426	0,530	0,260	0,984
I 90 - 5	$6,81 \times 10^{-2}$	0,085461	1,568853	0,712	0,249	0,996
I 90 - 15	$1,47 \times 10^{-2}$	0,121584	1,360806	0,698	0,237	0,987
I 90 - 25	$6,43 \times 10^{-3}$	0,125424	1,404026	0,611	0,282	0,981
I 90 - 35	$6,29 \times 10^{-5}$	0,174285	1,482020	0,555	0,312	0,980
II 00 - 5	$3,26 \times 10^{-3}$	0,082569	1,522687	0,626	0,273	0,996
II 00 - 15	$4,44 \times 10^{-3}$	0,090859	1,742952	0,603	0,261	0,987
II 00 - 25	$5,19 \times 10^{-4}$	0,063605	1,512541	0,581	0,249	0,995
II 00 - 35	$1,08 \times 10^{-4}$	0,051688	1,705421	0,514	0,298	0,999
II 30 - 5	$6,22 \times 10^{-3}$	0,181195	1,410083	0,659	0,240	0,966
II 30 - 15	$4,00 \times 10^{-3}$	0,076794	1,538675	0,614	0,225	0,983
II 30 - 25	$1,53 \times 10^{-3}$	0,160983	1,440528	0,632	0,269	0,979
II 30 - 35	$2,67 \times 10^{-5}$	0,087471	1,537589	0,537	0,314	0,987
II 60 - 5	$7,29 \times 10^{-2}$	0,080712	1,670759	0,738	0,271	0,977
II 60 - 15	$2,28 \times 10^{-2}$	0,122425	1,587793	0,670	0,288	0,983
II 60 - 25	$9,07 \times 10^{-4}$	0,165426	1,419757	0,699	0,232	0,983
II 60 - 35	$3,90 \times 10^{-5}$	0,075623	1,554924	0,564	0,293	0,994
II 90 - 5	$4,36 \times 10^{-2}$	0,117956	1,535472	0,684	0,236	0,996
II 90 - 15	$9,40 \times 10^{-3}$	0,155142	1,479555	0,731	0,263	0,982
II 90 - 25	$3,13 \times 10^{-3}$	0,084551	1,884162	0,643	0,271	0,995
II 90 - 35	$1,98 \times 10^{-5}$	0,084539	1,662318	0,535	0,320	0,981
III 00 - 5	$1,98 \times 10^{-3}$	0,064834	1,512305	0,606	0,282	0,995
III 00 - 15	$2,31 \times 10^{-3}$	0,044297	1,612544	0,612	0,239	0,994
III 00 - 25	$2,13 \times 10^{-3}$	0,041175	1,667281	0,591	0,255	0,989
III 00 - 35	$5,92 \times 10^{-5}$	0,091321	1,339861	0,583	0,304	0,997
III 30 - 5	$5,46 \times 10^{-3}$	0,183912	1,538965	0,686	0,275	0,974
III 30 - 15	$1,05 \times 10^{-2}$	0,159244	1,471944	0,653	0,259	0,971
III 30 - 25	$2,88 \times 10^{-3}$	0,081435	1,637244	0,618	0,261	0,989
III 30 - 35	$6,84 \times 10^{-5}$	0,174935	1,353163	0,551	0,288	0,986
III 60 - 5	$1,35 \times 10^{-2}$	0,174652	1,389390	0,711	0,250	0,988
III 60 - 15	$9,79 \times 10^{-3}$	0,170978	1,422791	0,685	0,242	0,989
III 60 - 25	$1,16 \times 10^{-2}$	0,085441	1,524633	0,629	0,273	0,991
III 60 - 35	$1,03 \times 10^{-4}$	0,091120	1,621399	0,544	0,337	0,995
III 90 - 5	$2,55 \times 10^{-2}$	0,099515	1,714622	0,741	0,262	0,991
III 90 - 15	$3,47 \times 10^{-2}$	0,181546	1,539707	0,710	0,274	0,984
III 90 - 25	$2,01 \times 10^{-2}$	0,141591	1,584550	0,686	0,245	0,975
III 90 - 35	$9,51 \times 10^{-5}$	0,111834	1,402840	0,523	0,281	0,991

* I00-5 indica uma amostra de repetição (I) - Tratamento (0 minhoca/m²) - profundidade (5 cm)

** c.d. = coeficiente de determinação

Tabela 4.3 Valores médios dos parâmetros das propriedades hidráulicas do solo, em quatro diferentes profundidades, Curitiba, 1994: (a) 5 cm; (b) 15 cm; (c) 25 cm; e (d) 35 cm.

(a)

Tratamento	Ks (cm/s)	α (1/cm)	n	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)
00	4,74 x 10 ⁻³ a	0,070050 b	1,568353 a	0,616 b	0,266 a
30	1,22 x 10 ⁻² a	0,164197 a	1,455296 a	0,661 b	0,259 a
60	3,36 x 10 ⁻² a	0,125427 ab	1,604647 a	0,712 a	0,263 a
90	4,57 x 10 ⁻² a	0,100977 b	1,606316 a	0,712 a	0,249 a

(b)

Tratamento	Ks (cm/s)	α (1/cm)	n	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)
00	3,77 x 10 ⁻³ a	0,071435 b	1,607231 a	0,593 b	0,257 a
30	7,26 x 10 ⁻³ a	0,110562 ab	1,466196 a	0,631 b	0,256 a
60	1,71 x 10 ⁻² a	0,123929 ab	1,537832 a	0,695 a	0,268 a
90	1,96 x 10 ⁻² a	0,152757 a	1,460021 a	0,713 a	0,258 a

(c)

Tratamento	Ks (cm/s)	α (1/cm)	n	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)
00	1,16 x 10 ⁻³ a	0,064582 a	1,654906 a	0,591 b	0,252 a
30	4,69 x 10 ⁻³ a	0,117208 a	1,501691 a	0,632 ab	0,263 a
60	6,90 x 10 ⁻³ a	0,119502 a	1,484920 a	0,658 a	0,246 a
90	9,89 x 10 ⁻³ a	0,117189 a	1,624246 a	0,647 ab	0,266 a

(d)

Tratamento	Ks (cm/s)	α (1/cm)	n	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)
00	6,69 x 10 ⁻⁵ a	0,076879 a	1,561836 a	0,550 a	0,293 a
30	5,87 x 10 ⁻⁵ a	0,125342 a	1,468393 a	0,554 a	0,301 a
60	6,24 x 10 ⁻⁵ a	0,085389 a	1,583583 a	0,546 a	0,297 a
90	5,93 x 10 ⁻⁵ a	0,123553 a	1,515726 a	0,538 a	0,304 a

Obs. Médias, da mesma coluna, seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Duncan, ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 4.4 Propriedades hidráulicas do solo, com quatro diferentes tratamentos, Curitiba, 1994.

Amostra *	Ks (cm/s)	α (1/cm)	n	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)
00 - 5	4,74 x 10 ⁻³	0,070050	1,568353	0,616	0,266
00 - 15	3,77 x 10 ⁻³	0,071435	1,607231	0,593	0,257
00 - 25	1,16 x 10 ⁻³	0,064582	1,654906	0,591	0,252
00 - 35	6,69 x 10 ⁻⁵	0,076879	1,561836	0,550	0,293
30 - 5	1,22 x 10 ⁻²	0,164197	1,455296	0,661	0,259
30 - 15	7,26 x 10 ⁻³	0,110562	1,466196	0,631	0,256
30 - 25	4,69 x 10 ⁻³	0,117208	1,501691	0,632	0,263
30 - 35	5,87 x 10 ⁻⁵	0,125342	1,468393	0,554	0,301
60 - 5	3,36 x 10 ⁻²	0,125427	1,604647	0,712	0,263
60 - 15	1,71 x 10 ⁻²	0,123929	1,537832	0,695	0,268
60 - 25	6,90 x 10 ⁻³	0,119502	1,484920	0,658	0,246
60 - 35	6,24 x 10 ⁻⁵	0,085389	1,583583	0,546	0,297
90 - 5	4,57 x 10 ⁻²	0,100977	1,606316	0,712	0,249
90 - 15	1,96 x 10 ⁻²	0,152757	1,460021	0,713	0,258
90 - 25	9,89 x 10 ⁻³	0,117189	1,624246	0,647	0,266
90 - 35	5,93 x 10 ⁻⁵	0,123553	1,515726	0,538	0,304

* 00-5 indica uma amostra de Tratamento (0 minhoca/m²) - profundidade (5 cm).

profundidade na Figura 4.1. Através destas figuras, claramente se observa que o valor de K_s diminui grandemente com a profundidade e que maiores populações de minhocas induziram maiores valores de K_s (Figura 4.1a). O valor de α apresentou tendência de aumento com a população, mas não com a profundidade (Figura 4.1b). Com respeito a n , não há influência clara dos tratamentos e das profundidades sobre seu valor (Figura 4.1c). O comportamento de θ_s é semelhante ao de K_s . Os comportamentos de K_s e θ_s foram causados pela atividade das minhocas, provavelmente pela construção das galerias.

O valor de θ_r é maior na profundidade de 35 cm (Figura 4.1e). Isto concorda com os resultados de SHINOMIYA (1993) que demonstrou uma correlação positiva entre o valor de θ_r e o teor de silte e argila do solo. A mesma figura mostra que o valor de θ_r não se alterou com os tratamentos. Isto sugere que as minhocas não alteraram o teor de silte e argila do solo durante o experimento, apesar deles não terem sido avaliados.

A Figura 4.1 também mostra visualmente que as minhocas influenciam as propriedades hidráulicas do solo até 30 cm de profundidade e que esta influência se reduz com o aumento da profundidade.

4.3 SISTEMA DE POROS DO SOLO

Como foi mencionado acima, as minhocas influenciaram as propriedades hidráulicas do solo até 30 cm de profundidade. Daqui em diante serão discutidas as distribuições de tamanho dos poros do solo até 30 cm de profundidade. A Tabela 4.5 mostra os valores de θ dos solos correspondentes aos vários valores de sucção. Aqueles valores foram calculados com os valores de α , n , θ_s e θ_r da Tabela 4.3, usando-se a Eq.(2).

Usando estes valores, são mostradas na Figura 4.2 as distribuições dos vários tipos de porosidade de cada amostra, sujeito a classificação proposta por TAKESHITA (1985). Nesta classificação, a macroporosidade é calculada como $\theta_s - \theta_{0,7}$. Semelhantemente, as porosidades-média, pequena e fina, são calculadas como $\theta_{0,7} - \theta_{1,7}$, $\theta_{1,7} - \theta_{2,7}$ e $\theta_{2,7} - \theta_{4,2}$, respectivamente.

Embora não tenha sido feita comparação estatística das porosidades entre os quatro tratamentos, a Figura 4.2 mostra que o valor da porosidade constituída pelos maiores poros recebeu maior influência das minhocas. Isto indica que as minhocas exerceram maior influência sobre os maiores poros do que sobre os menores.

Usando os valores da Tabela 4.5, o valor de $\theta_s - \theta_c$ do solo de cada tratamento foi calculado (Tabela 4.6). Neste estudo, assume-se que θ_c é igual à $\theta_{1,7}$. Normalmente, $\theta_s - \theta_c$ representa a porosidade livre da água, ou seja, a aeração do solo. Portanto, as minhocas podem ser consideradas como melhoradoras da aeração do solo para as plantas. Assim, o presente trabalho mostra que quanto maior a população de minhocas, melhor aeração.

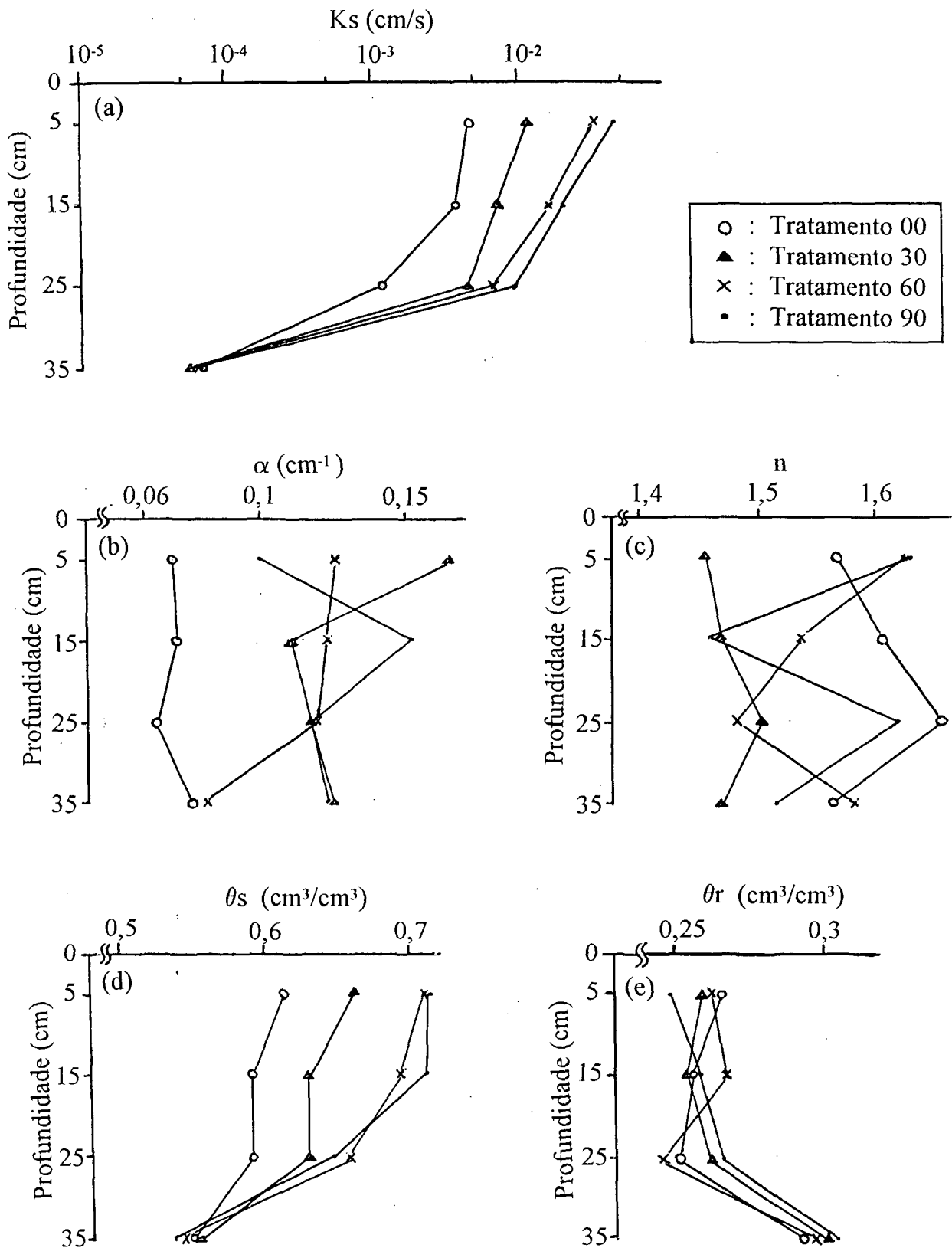


Figura 4.1 Variação dos parâmetros das propriedades hidráulicas do solo com a profundidade, Curitiba, 1994: (a) K_s , (b) α , (c) n , (d) θ_s , e (e) θ_r

Tabela 4.5 Valores de θ correspondentes aos vários valores de sucção, Curitiba, 1994.

Amostra *	θ_s	θ_0	$\theta_{0,47}$	$\theta_{0,7}$	$\theta_{1,7}$	$\theta_{2,7}$	$\theta_{4,2}$	θ_r
00 - 5	0,616	0,614	0,606	0,594	0,430	0,312	0,273	0,266
00 - 15	0,593	0,591	0,583	0,571	0,405	0,295	0,262	0,257
00 - 25	0,591	0,590	0,583	0,572	0,401	0,287	0,256	0,252
30 - 5	0,661	0,652	0,624	0,596	0,411	0,313	0,270	0,259
30 - 15	0,631	0,626	0,610	0,591	0,421	0,314	0,268	0,256
30 - 25	0,632	0,627	0,609	0,589	0,411	0,311	0,271	0,263
60 - 5	0,712	0,706	0,681	0,651	0,408	0,300	0,268	0,263
60 - 15	0,695	0,689	0,667	0,640	0,425	0,314	0,275	0,268
60 - 25	0,658	0,652	0,632	0,610	0,415	0,303	0,257	0,246
90 - 5	0,712	0,708	0,689	0,664	0,418	0,292	0,254	0,249
90 - 15	0,713	0,704	0,675	0,645	0,434	0,320	0,271	0,258
90 - 25	0,647	0,643	0,623	0,599	0,390	0,294	0,270	0,266

* 00-5 indica uma amostra de Tratamento (0 minhoca/m²) - profundidade (5 cm).

Tabela 4.6 Valor de $\theta_s - \theta_c$ (cm³/cm³), Curitiba, 1994

Camada (cm)	Tratamento			
	00	30	60	90
0 - 10	0,186	0,250	0,304	0,294
10 - 20	0,188	0,210	0,270	0,279
20 - 30	0,190	0,221	0,243	0,257
total (mm)	56,4	68,1	81,7	83,0
média (cm³/cm³)	0,188	0,227	0,272	0,277

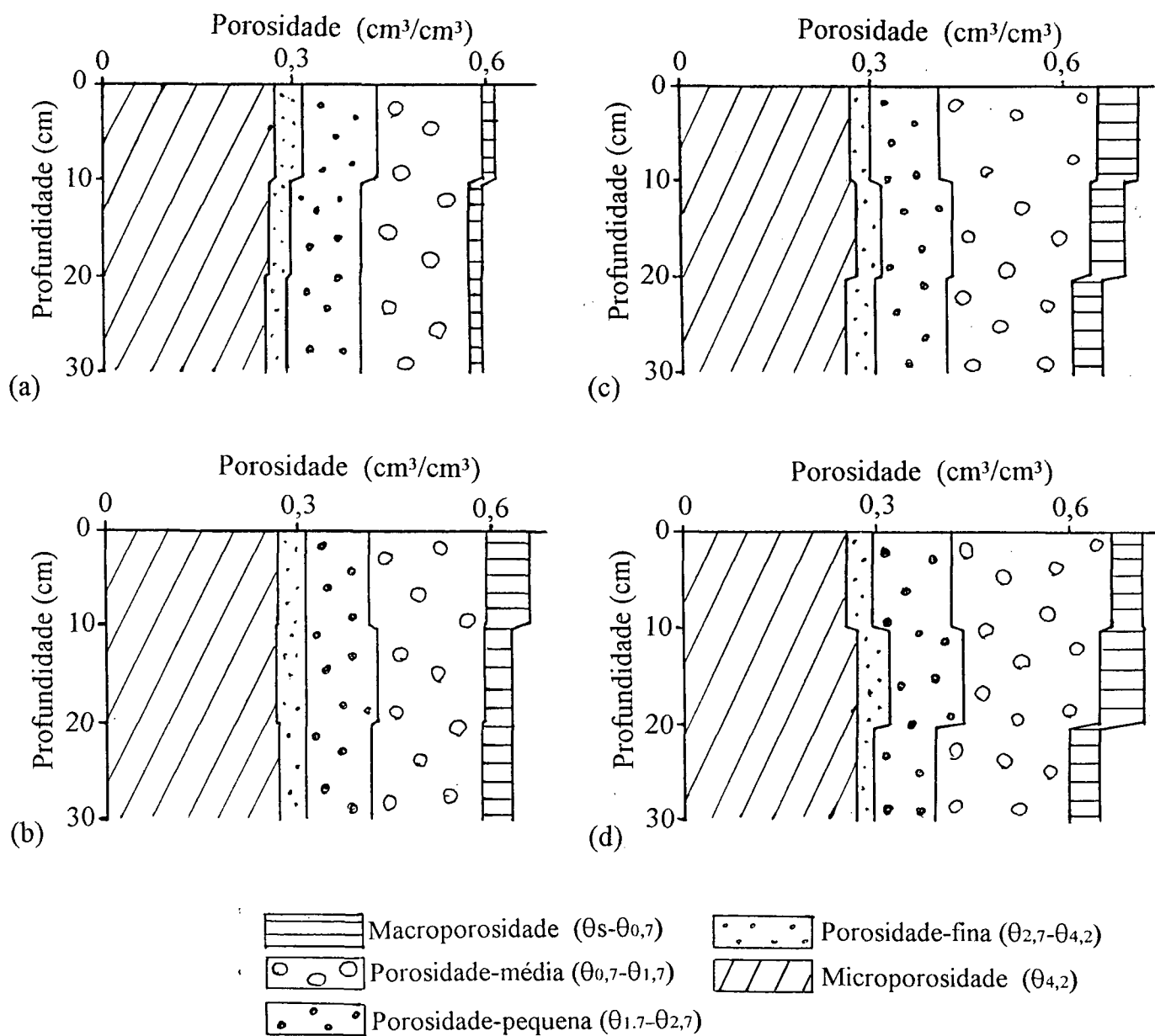


Figura 4.2 Distribuição de vários tipos de porosidade do solo, Curitiba, 1994:

(a) Tratamento 00, (b) Tratamento 30, (c) Tratamento 60 e (d) Tratamento 90

Na Tabela 4.7 são mostrados os valores de $\theta_c - \theta_r$ de todas as amostras, notando-se que este valor de $\theta_c - \theta_r$ representa o intervalo de unidade de água disponível para as plantas. Pela observação desta tabela pode-se afirmar que os solos com as minhocas apresentam maior intervalo de unidade de água disponível do que o solo sem as minhocas, mas sendo a diferença entre si muito pequena.

O valor de $\theta_{0,7} - \theta_{2,7}$, segundo TAKESHITA (1985), representa a porosidade-grosseira que fornece água para os rios, e seus valores de cada amostra são mostrados na Tabela 4.8. O aumento do valor de $\theta_{0,7} - \theta_{2,7}$, com o aumento da população de minhocas, não foi devido ao aumento de $\theta_{1,7} - \theta_{2,7}$, mas sim ao aumento de $\theta_{0,7} - \theta_{1,7}$.

Considerando o fato que as minhocas não alteram o valor de θ_r , os valores de $\theta_s - \theta_r$ também aumentaram com a população das minhocas (Tabela 4.9). Este valor é o intervalo de unidade dentro da qual a água pode se movimentar.

Observando-se as Tabelas 4.5 a 4.9 e a Figura 4.2, pode-se dizer que as minhocas possuem maior contribuição de alteração da porosidade do solo através da modificação dos poros maiores do que 0,06 mm de diâmetro.

Segundo LEE (1985), as galerias de minhocas constituem os poros maiores que 1 mm de diâmetro. A Tabela 4.10 mostra o valor de $\theta_s - \theta_{0,47}$. Nesta tabela, os valores dos Tratamentos 30, 60 e 90, subtraídos do valor da testemunha, indicam a porosidade gerada pelas minhocas nos Tratamentos 30, 60 e 90, respectivamente (Figura 4.3). Em geral, as minhocas são mais ativas quanto menor for a profundidade em que se encontram. Os valores médios da porosidade gerada pelas minhocas são 1,8 %, 1,9 % e 1,9 % nos Tratamentos 30, 60 e 90, respectivamente. Embora haja influência das minhocas sobre os valores de $\theta_s - \theta_{0,47}$, como pode ser observado pela diferença entre a testemunha e os outros tratamentos, é difícil mostrar diferença entre os Tratamentos 30, 60 e 90. Na mesma figura, a ordem dos valores da porosidade gerada pelas galerias das minhocas dos Tratamentos 30, 60 e 90 é o inverso da profundidade 5 cm à 15 cm. Em outras palavras, no Tratamento 30, esta porosidade reduziu-se bastante com a profundidade e contrariamente no Tratamento 90, aumentou-se a porosidade. Isto ocorreu provavelmente porque no Tratamento 90, a alta população das minhocas causou a maior concorrência e as minhocas viveram não na superfície e sim na parte mais baixa.

Para analisar a distribuição de tamanho dos poros mais detalhadamente, uma função $\left| C(\psi) \right| = \left| \frac{d\theta}{d\psi} \right|$ é bem útil. As Tabelas 4.11 e 4.12 mostram os valores de $C(\psi)$ pela aplicação da Eq.(6) para os dados da Tabela 4.4. $\psi_{M\acute{A}X}$ é o valor que produz o máximo valor de $\left| C(\psi) \right|$. Usando os dados das Tabelas 4.11 e 4.12, os gráficos de $\left| C(\psi) \right|$ são mostrados com comparação dos tratamentos na Figura 4.4. Esta figura mostra que os picos dos gráficos de

Tabela 4.7 Valor de $\theta_c - \theta_r$ em mm , Curitiba, 1994.

Camada (cm)	Tratamento			
	00	30	60	90
0 - 10	16,4	15,2	14,5	16,9
10 - 20	14,8	16,5	15,7	17,6
20 - 30	14,9	14,8	16,9	12,4
total	46,1	46,5	47,1	46,9

Tabela 4.8 Valores de $\theta_{0,7} - \theta_{1,7}$, $\theta_{1,7} - \theta_{2,7}$ e $\theta_{0,7} - \theta_{2,7}$, em mm , do solo, Curitiba, 1994.

Camada (cm)	Tratamento							
	00		30		60		90	
	$\theta_{0,7} - \theta_{1,7}$	$\theta_{1,7} - \theta_{2,7}$	$\theta_{0,7} - \theta_{1,7}$	$\theta_{1,7} - \theta_{2,7}$	$\theta_{0,7} - \theta_{1,7}$	$\theta_{1,7} - \theta_{2,7}$	$\theta_{0,7} - \theta_{1,7}$	$\theta_{1,7} - \theta_{2,7}$
0 - 10	16,4	11,8	18,5	9,8	24,3	10,8	24,6	12,6
10 - 20	16,6	11,0	17,0	10,7	21,5	11,1	21,1	11,4
20 - 30	17,1	11,4	17,8	10,0	19,5	11,2	20,9	9,6
sub-total	50,1	34,2	53,3	30,5	65,3	33,1	66,6	33,6
total ($\theta_{0,7} - \theta_{2,7}$)	84,3		83,8		98,4		100,2	

Tabela 4.9 Valores de $\theta_s - \theta_r$ em mm, Curitiba, 1994.

Camada (cm)	Tratamento			
	00	30	60	90
0 - 10	35,0	40,2	44,9	46,3
10 - 20	33,6	37,5	42,7	45,5
20 - 30	33,9	36,9	41,2	38,1
total	102,5	114,6	128,8	129,9

Tabela 4.10 Valores de $\theta_s - \theta_{0,47}$ (cm^3/cm^3), Curitiba, 1994.

Camada (cm)	Tratamento			
	00	30	60	90
0 - 10	0,010	0,037	0,031	0,023
10 - 20	0,010	0,021	0,028	0,038
20 - 30	0,008	0,023	0,026	0,024

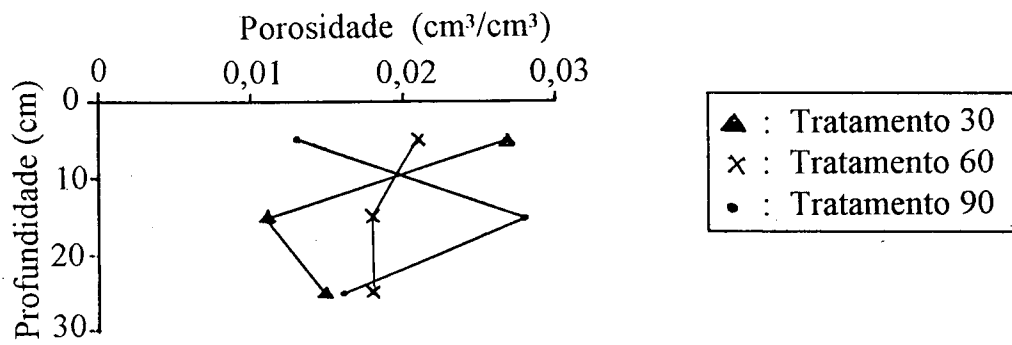


Figura 4.3 Distribuição vertical da porosidade gerada pelas galerias das minhocas, Curitiba, 1994.

Tabela 4.11 Valores de $|C(\psi)|$ do solo, em cm^{-1} , Curitiba, 1994.

Amostra *	$ \psi $ (cm)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
00 - 5	$3,0116 \times 10^{-3}$	$4,2899 \times 10^{-3}$	$5,1276 \times 10^{-3}$	$5,6837 \times 10^{-3}$	$6,0361 \times 10^{-3}$	$6,2359 \times 10^{-3}$	$6,3209 \times 10^{-3}$	$6,3198 \times 10^{-3}$
00 - 15	$2,8782 \times 10^{-3}$	$4,2149 \times 10^{-3}$	$5,1176 \times 10^{-3}$	$5,7312 \times 10^{-3}$	$6,1296 \times 10^{-3}$	$6,3633 \times 10^{-3}$	$6,4709 \times 10^{-3}$	$6,4832 \times 10^{-3}$
00 - 25	$2,3483 \times 10^{-3}$	$3,5828 \times 10^{-3}$	$4,4759 \times 10^{-3}$	$5,1309 \times 10^{-3}$	$5,5995 \times 10^{-3}$	$5,9179 \times 10^{-3}$	$6,1148 \times 10^{-3}$	$6,2145 \times 10^{-3}$
30 - 5	$1,2048 \times 10^{-2}$	$1,4282 \times 10^{-2}$	$1,4584 \times 10^{-2}$	$1,4051 \times 10^{-2}$	$1,3172 \times 10^{-2}$	$1,2187 \times 10^{-2}$	$1,1208 \times 10^{-2}$	$1,0287 \times 10^{-2}$
30 - 15	$6,5782 \times 10^{-3}$	$8,3414 \times 10^{-3}$	$9,1040 \times 10^{-3}$	$9,3287 \times 10^{-3}$	$9,2417 \times 10^{-3}$	$8,9754 \times 10^{-3}$	$8,6112 \times 10^{-3}$	$8,1997 \times 10^{-3}$
30 - 25	$7,0244 \times 10^{-3}$	$9,0825 \times 10^{-3}$	$9,9803 \times 10^{-3}$	$1,0239 \times 10^{-2}$	$1,0126 \times 10^{-2}$	$9,8007 \times 10^{-3}$	$9,3631 \times 10^{-3}$	$8,8740 \times 10^{-3}$
60 - 5	$9,2466 \times 10^{-3}$	$1,2802 \times 10^{-2}$	$1,4531 \times 10^{-2}$	$1,5143 \times 10^{-2}$	$1,5068 \times 10^{-2}$	$1,4588 \times 10^{-2}$	$1,3889 \times 10^{-2}$	$1,3090 \times 10^{-2}$
60 - 15	$8,7773 \times 10^{-3}$	$1,1576 \times 10^{-2}$	$1,2804 \times 10^{-2}$	$1,3147 \times 10^{-2}$	$1,2973 \times 10^{-2}$	$1,2508 \times 10^{-2}$	$1,1893 \times 10^{-2}$	$1,1215 \times 10^{-2}$
60 - 25	$8,0627 \times 10^{-3}$	$1,0269 \times 10^{-2}$	$1,1176 \times 10^{-2}$	$1,1386 \times 10^{-2}$	$1,1202 \times 10^{-2}$	$1,0801 \times 10^{-2}$	$1,0288 \times 10^{-2}$	$9,7287 \times 10^{-3}$
90 - 5	$6,8217 \times 10^{-3}$	$9,7081 \times 10^{-3}$	$1,1378 \times 10^{-2}$	$1,2258 \times 10^{-2}$	$1,2599 \times 10^{-2}$	$1,2574 \times 10^{-2}$	$1,2310 \times 10^{-2}$	$1,1897 \times 10^{-2}$
90 - 15	$1,2411 \times 10^{-2}$	$1,4955 \times 10^{-2}$	$1,5500 \times 10^{-2}$	$1,5126 \times 10^{-2}$	$1,4337 \times 10^{-2}$	$1,3387 \times 10^{-2}$	$1,2407 \times 10^{-2}$	$1,1462 \times 10^{-2}$
90 - 25	$7,0101 \times 10^{-3}$	$9,9406 \times 10^{-3}$	$1,1500 \times 10^{-2}$	$1,2181 \times 10^{-2}$	$1,2290 \times 10^{-2}$	$1,2041 \times 10^{-2}$	$1,1580 \times 10^{-2}$	$1,1006 \times 10^{-2}$

Cont.

Amostra	$ \psi $ (cm)							
	9	10	11	12	13	14	15	
00 - 5	$6,2553 \times 10^{-3}$	$6,1449 \times 10^{-3}$	$6,0021 \times 10^{-3}$	$5,8373 \times 10^{-3}$	$5,6586 \times 10^{-3}$	$5,4719 \times 10^{-3}$	$5,2818 \times 10^{-3}$	
00 - 15	$6,4243 \times 10^{-3}$	$6,3137 \times 10^{-3}$	$6,1664 \times 10^{-3}$	$5,9941 \times 10^{-3}$	$5,8057 \times 10^{-3}$	$5,6082 \times 10^{-3}$	$5,4065 \times 10^{-3}$	
00 - 25	$6,2375 \times 10^{-3}$	$6,2007 \times 10^{-3}$	$6,1884 \times 10^{-3}$	$6,0021 \times 10^{-3}$	$5,8611 \times 10^{-3}$	$5,7031 \times 10^{-3}$	$5,5338 \times 10^{-3}$	
30 - 5	$9,4440 \times 10^{-3}$	$8,6827 \times 10^{-3}$	$8,0000 \times 10^{-3}$	$7,3896 \times 10^{-3}$	$6,8440 \times 10^{-3}$	$6,3560 \times 10^{-3}$	$5,9185 \times 10^{-3}$	
30 - 15	$7,7720 \times 10^{-3}$	$7,3470 \times 10^{-3}$	$6,9357 \times 10^{-3}$	$6,5442 \times 10^{-3}$	$6,1756 \times 10^{-3}$	$5,8308 \times 10^{-3}$	$5,5096 \times 10^{-3}$	
30 - 25	$8,3706 \times 10^{-3}$	$7,8747 \times 10^{-3}$	$7,3989 \times 10^{-3}$	$6,9495 \times 10^{-3}$	$6,5294 \times 10^{-3}$	$6,1392 \times 10^{-3}$	$5,7781 \times 10^{-3}$	
60 - 5	$1,2261 \times 10^{-2}$	$1,1446 \times 10^{-2}$	$1,0668 \times 10^{-2}$	$9,9375 \times 10^{-3}$	$9,2606 \times 10^{-3}$	$8,6373 \times 10^{-3}$	$8,0658 \times 10^{-3}$	
60 - 15	$1,0524 \times 10^{-2}$	$9,8494 \times 10^{-3}$	$9,2082 \times 10^{-3}$	$8,6076 \times 10^{-3}$	$8,0505 \times 10^{-3}$	$7,5366 \times 10^{-3}$	$7,0644 \times 10^{-3}$	
60 - 25	$9,1613 \times 10^{-3}$	$8,6078 \times 10^{-3}$	$8,0803 \times 10^{-3}$	$7,5847 \times 10^{-3}$	$7,1231 \times 10^{-3}$	$6,6955 \times 10^{-3}$	$6,3008 \times 10^{-3}$	
90 - 5	$1,1399 \times 10^{-2}$	$1,0857 \times 10^{-2}$	$1,0302 \times 10^{-2}$	$9,7512 \times 10^{-3}$	$9,2170 \times 10^{-3}$	$8,7064 \times 10^{-3}$	$8,2230 \times 10^{-3}$	
90 - 15	$1,0581 \times 10^{-2}$	$9,7728 \times 10^{-3}$	$9,0400 \times 10^{-3}$	$8,3785 \times 10^{-3}$	$7,7826 \times 10^{-3}$	$7,2458 \times 10^{-3}$	$6,7619 \times 10^{-3}$	
90 - 25	$1,0383 \times 10^{-2}$	$9,7505 \times 10^{-3}$	$9,1329 \times 10^{-3}$	$8,5438 \times 10^{-3}$	$7,9901 \times 10^{-3}$	$7,4747 \times 10^{-3}$	$6,9978 \times 10^{-3}$	

* 00-5 indica uma amostra de Tratamento (0 minhoca/m²) - profundidade (5 cm).

Tabela 4.12 Valores de $|\psi_{M\acute{A}X}|$, $|C(\psi_{M\acute{A}X})|$ e D_M , Curitiba, 1994.

Amostra *	$ \psi_{M\acute{A}X} $ (cm)	$ C(\psi_{M\acute{A}X}) $ (cm ⁻¹)	D_M (mm)
00 - 5	7,473367	$6,3296 \times 10^{-3}$	0,4014
00 - 15	7,639675	$6,4881 \times 10^{-3}$	0,3927
00 - 25	8,843318	$6,2382 \times 10^{-3}$	0,3392
30 - 5	2,740701	$1,4615 \times 10^{-2}$	1,0946
30 - 15	4,139963	$9,3315 \times 10^{-3}$	0,7246
30 - 25	4,111220	$1,0241 \times 10^{-2}$	0,7297
60 - 5	4,339630	$1,5178 \times 10^{-2}$	0,6913
60 - 15	4,075071	$1,3149 \times 10^{-2}$	0,7362
60 - 25	3,938332	$1,1387 \times 10^{-2}$	0,7617
90 - 5	5,399579	$1,2624 \times 10^{-2}$	0,5556
90 - 15	2,967938	$1,5500 \times 10^{-2}$	1,0108
90 - 25	4,736175	$1,2304 \times 10^{-2}$	0,6334

* 00-5 indica uma amostra de Tratamento (0 minhoca/m²) - profundidade (5 cm).

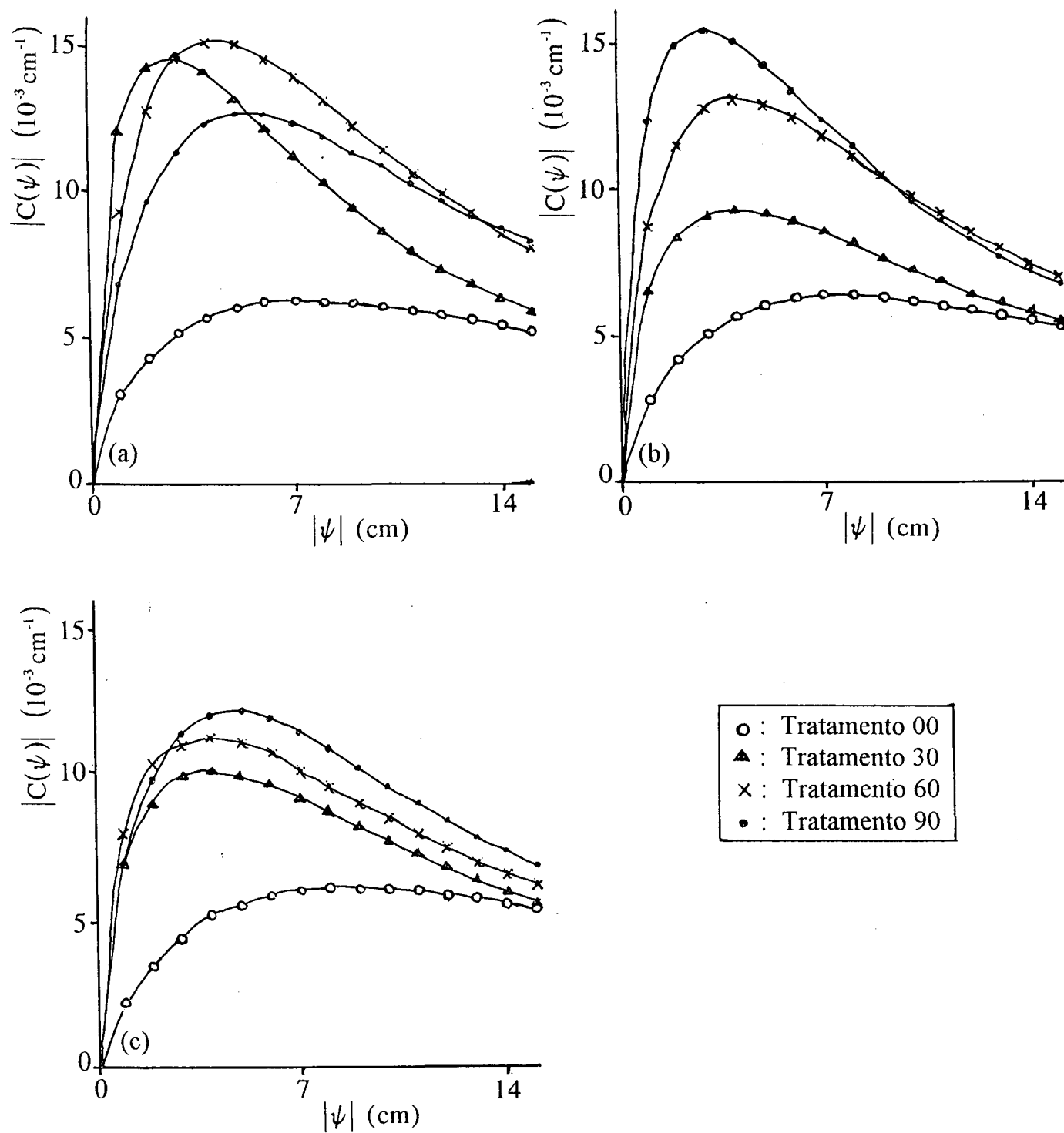


Figura 4.4 Curva de $C(\psi)$ com diferentes tratamentos, Curitiba, 1994:

(a) Tratamento 00, (b) Tratamento 30, (c) Tratamento 60 e (d) Tratamento 90.

$|C(\psi)|$ aumentam com o aumento da população das minhocas e que $|\psi_{MÁX}|$ diminui, apesar de não possuir comportamento padrão para os tratamentos com minhoca (30, 60 e 90). Entretanto, pelo menos, observa-se que as minhocas aumentam o tamanho médio do poro, D_M , definido por COLLIS-GEORGE et al. (1971). Houve também redução nos valores de $|\psi_{MÁX}|$ e um aumento da porosidade dos poros, que possuem tamanho próximo ao valor de D_M (Tabela 4.12 e Figura 4.5). O tamanho médio do poro de cada amostra foi determinado usando a Eq. (10).

A ordem dos valores de D_M é o inverso da profundidade 5 cm à 15 cm (Figura 4.5). O mesmo comportamento foi encontrado na Figura 4.3. Este comportamento mostrado na Figura 4.5 ocorreu, provavelmente porque, no Tratamento 90, a alta população de minhocas causou a retirada destas da superfície do solo, para a parte mais baixa.

4.4 CRESCIMENTO DA BRACATINGA

A Tabela 4.13 mostra os valores médios mensais de altura da bracatinga, de outubro de 1993 a fevereiro de 1994 (idade de 3 a 7 meses), e sua sobrevivência até fevereiro de 1994. A análise de variância não mostrou diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos para nenhum dos dois parâmetros, altura e sobrevivência.

A Tabela 4.13 (a) e (b) foi obtidas pela realização do teste de Duncan, ao nível de 5% de probabilidade, com os dados de todas as árvores de uma parcela (20 árvores) e com os das plantas úteis (6 árvores), respectivamente. Embora não tenha havido diferença significativa quanto à sobrevivência e à altura, exceto para o mês de fevereiro, como mostra a Tabela 4.13(a), pode-se observar claramente que as bracatingas cresceram mais quando a população de minhocas foi maior. Somente nos últimos dois meses de observação (janeiro e fevereiro de 1994), as bracatingas do Tratamento 60 mostraram maior crescimento dentre os quatro tratamentos. Isto é graficamente mostrado na Figura 4.6.

Os valores médios de coeficiente de variação dos dados da Tabela 4.13 (a) e (b) são 11,94% e 16,83%, respectivamente. Isto indica que, neste estudo, pode-se considerar os dados de todas as árvores, sem desprezar a bordadura. Deve-se fazer uso dos dados de todas as árvores pois isto aumenta a eficiência das análises estatísticas, pelo menor coeficiente de variação.

Os pesos secos de caule, folha e total (caule + folha) de todas as árvores (20 árvores por parcela) da bracatinga foram tomados na última medição de altura, em fevereiro de 1994, e calculados de forma semelhante ao peso/parcela e ao peso/árvore (Tabela 4.14). A análise de variância não demonstrou significância estatística para todos os dados entre os quatro tratamentos. Foi entretanto, observada a influência das minhocas sobre os pesos secos de caule

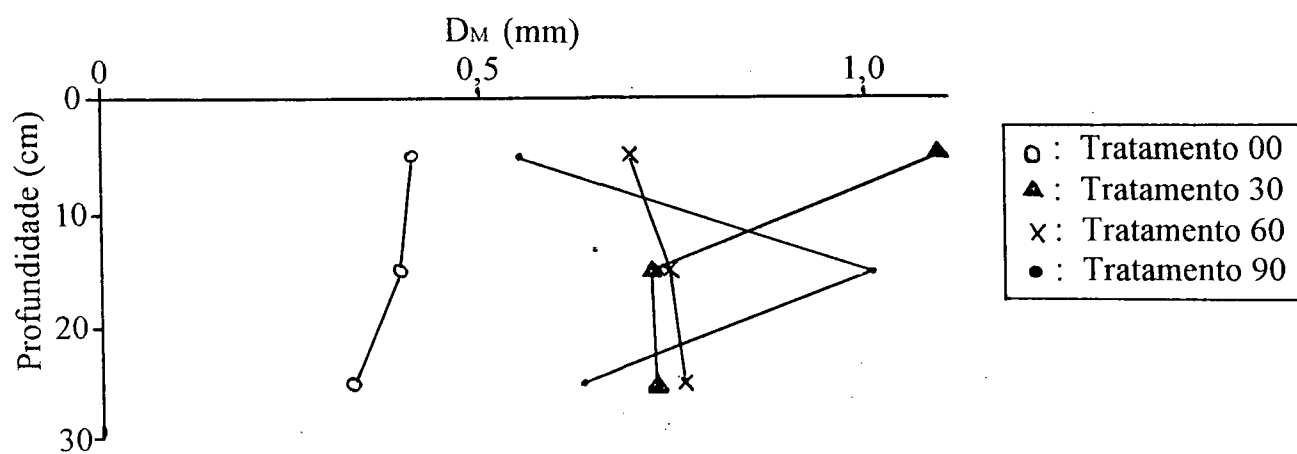


Figura 4.5 Distribuição vertical de tamanho médio do poro, D_M (mm), Curitiba, 1994

Tabela 4.13 Média mensal da altura da bracatinga e sua sobrevivência nos quatro tratamentos, Curitiba, 1993/94: (a) total de plantas (b) plantas úteis.

(a)

Tratamento	altura (cm)					Sobrevivência (%)	
	OUT/93	NOV/93	DEZ/93	JAN/94	FEV/94	FEV/94	
00	24 a	63 a	142 a	207 a	249 b	86,25 a	
30	23 a	70 a	156 a	226 a	278 ab	92,50 a	
60	23 a	75 a	165 a	237 a	291 a	93,75 a	
90	27 a	76 a	165 a	236 a	283 ab	90,00 a	
C.V. (%)	16,40	16,88	11,64	8,26	8,08	10,36	

(b)

Tratamento	altura (cm)					Sobrevivência (%)	
	OUT/93	NOV/93	DEZ/93	JAN/94	FEV/94	FEV/94	
00	24 a	63 a	139 a	201 a	241 a	83,25 a	
30	24 a	65 a	152 a	223 a	267 a	87,50 a	
60	26 a	68 a	160 a	225 a	278 a	87,50 a	
90	26 a	80 a	165 a	232 a	275 a	87,50 a	
C.V. (%)	10,59	22,49	17,91	15,70	13,45	20,83	

Obs: Médias, da mesma coluna, seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 4.14 Peso seco, em grama, da parte aérea da bracatinga, Curitiba, 1994.

Tratamento	peso/parcela			peso/árvore		
	caule	folha	total	caule	folha	total
00	1047,20 b	266,95 a	1314,15 b	61,18 a	16,20 a	77,38 a
30	1454,85 ab	427,15 a	1882,00 b	78,60 a	22,95 a	101,55 a
60	1714,69 a	499,91 a	2214,60 a	92,13 a	26,81 a	118,94 a
90	1488,71 a	472,46 a	1961,17 ab	82,17 a	26,04 a	108,21 a
C.V. (%)	24,46	24,98	25,43	25,57	11,31	26,38

Obs: Médias, da mesma coluna, seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade.

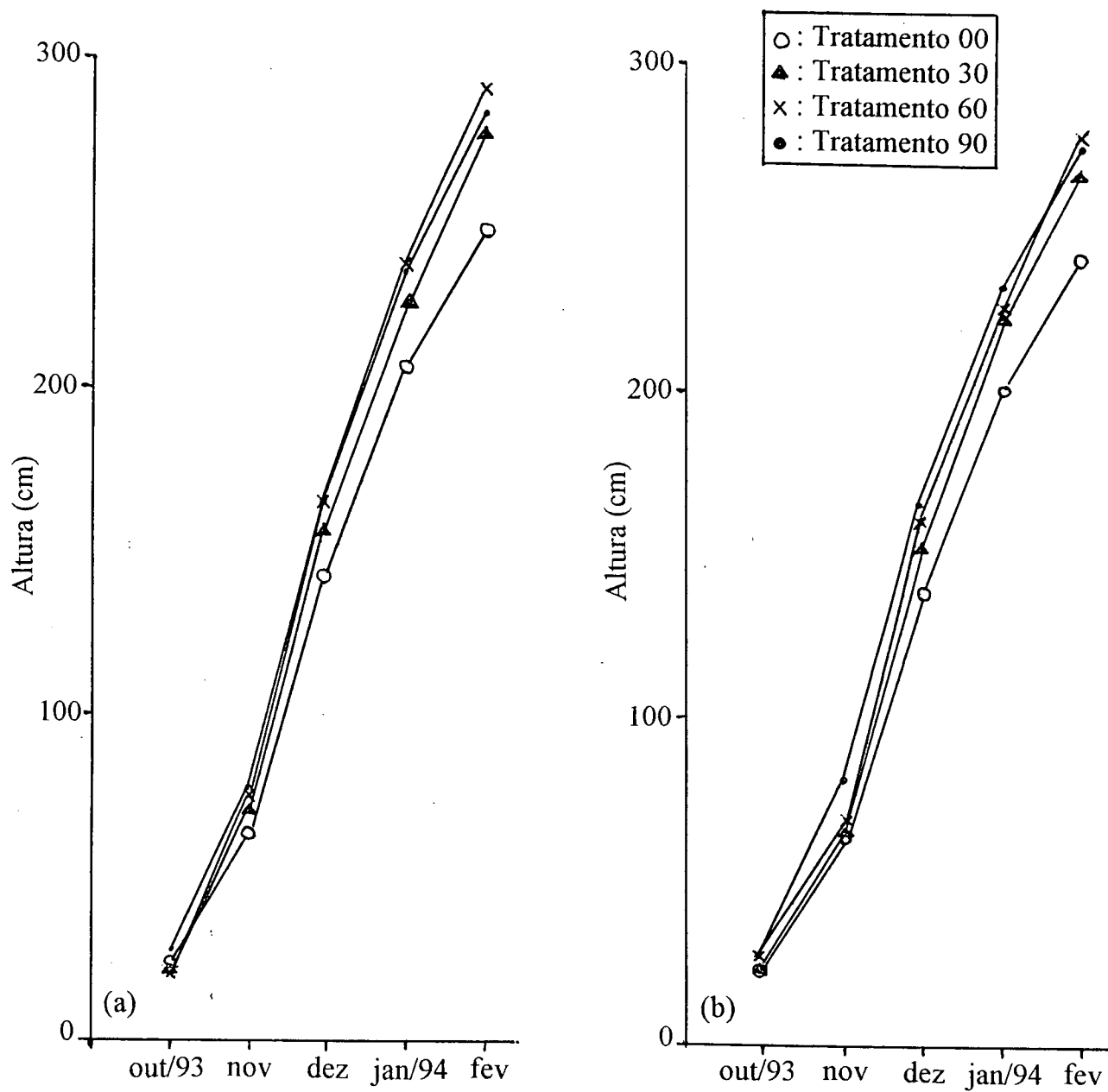


Figura 4.6 Crescimento da bracatinga em altura de 3 até 7 meses de idade, Curitiba, 1993/94:(a) média de todas as plantas, (b) média de plantas úteis

e do total/parcela, usando o teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. O fato de que não observou-se esta mesma influência sobre os pesos/árvore pode estar associado a maior sobrevivência da bracatinga nos tratamentos com inoculação das minhocas e conseqüentemente com o maior número de árvores/parcela.

A relação entre os pesos secos e os tratamentos mostra a mesma tendência que foi observada entre as alturas e os tratamentos. Isto indica uma relação positiva entre o peso seco e a altura da bracatinga.

Os maiores valores de altura e de produção de biomassa observados nos tratamentos com inoculação de minhocas, podem ser associados às melhorias geradas por estas em alguns fatores do solo, como a aeração e as condições hídricas. A Figura 4.7 demonstra as relações da altura média da bracatinga em fevereiro de 1994 com a aeração do solo e com a água disponível do solo. Através da figura, pode-se observar que estas relações são positivas, ou seja quanto melhor aeração e condições hídricas do solo, ocorre maior crescimento da bracatinga.

Apesar dos melhores resultados com a inoculação das minhocas, o tratamento com 60 minhocas/m² teve respostas superiores ao do tratamento com 90 minhocas/m², mas esta diferença não foi estatisticamente significativa.

4.5 HIDROGRAMA

Para análise numérica, foram executados totalmente 9 casos. Aqui, considerou-se que a coluna, que possui um comprimento de 100 cm, é constituída por duas camadas. A camada superior e a camada inferior podem ser diferenciadas, por sofrerem ou não influência das minhocas, como camada com influência e sem influência, respectivamente.

Os parâmetros das propriedades hidráulicas do solo são mostrados na Tabela 4.15. Estes resultaram dos resultados obtidos no experimento laboratorial das propriedades hidráulicas do solo não-deformado, mostrados na Tabela 4.4. Os parâmetros das camadas inferior e superior foram determinados, utilizando-se os valores médios aproximados dos dados do solo até 25 cm de profundidade no Tratamento 00 para a camada inferior e nos Tratamentos 30, 60 e 90 para a camada superior.

O caso 1 consiste numa camada (Camada Inferior) e o caso 5 em outra camada (Camada Superior). Naquele caso, a coluna de solo não recebeu influência das minhocas, enquanto neste, a influência atingiu a coluna inteira. Os casos 1 a 5 possuem os mesmos valores dos parâmetros exceto a espessura das camadas. Nestes Casos, a espessura da camada superior aumenta. Os Casos 3, 6 e 7 possuem os mesmo valores dos parâmetros exceto θ_s da camada superior. Os valores de θ_s são 0,70, 0,75 e 0,80 nos Casos 3, 6 e 7, respectivamente.

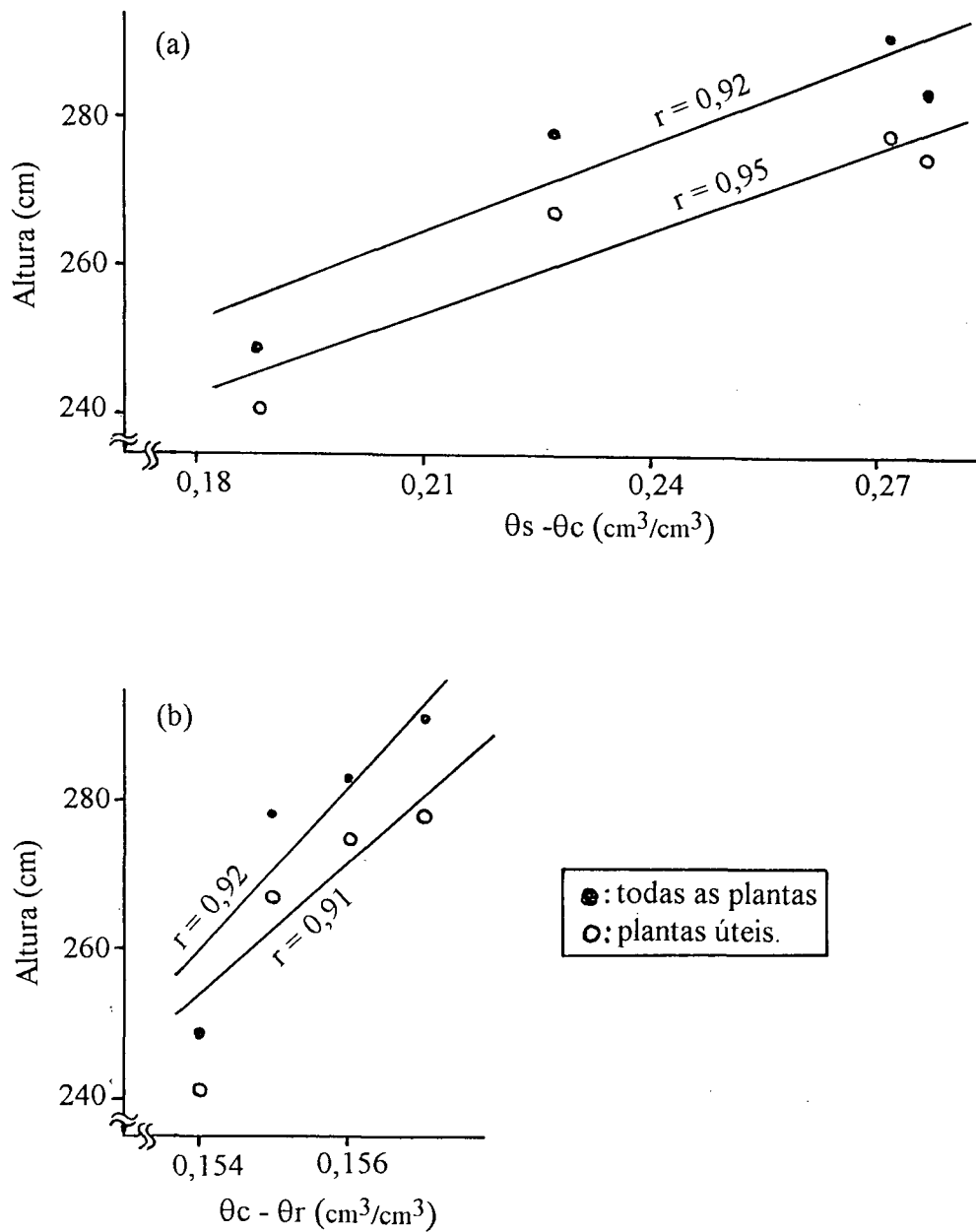


Figura 4.7 Relação da altura média da bracatinga em fevereiro de 1994, Curitiba, com:
(a) aeração do solo, $\theta_s - \theta_c$; (b) água disponível do solo, $\theta_c - \theta_r$

Tabela 4.15 Parâmetros do solo de 9 casos na simulação numérica.

Caso	Camada	Ks cm/s	θ_s cm ³ /cm ³	θ_r cm ³ /cm ³	α 1/cm	n	espessura cm
1	S						0
	I	3×10^{-3}	0,60	0,25	0,07	1,60	100
2	S	3×10^{-2}	0,70	0,25	0,13	1,55	20
	I	3×10^{-3}	0,60	0,25	0,07	1,60	80
3	S	3×10^{-2}	0,70	0,25	0,13	1,55	30
	I	3×10^{-3}	0,60	0,25	0,07	1,60	70
4	S	3×10^{-2}	0,70	0,25	0,13	1,55	50
	I	3×10^{-3}	0,60	0,25	0,07	1,60	50
5	S	3×10^{-2}	0,70	0,25	0,13	1,55	100
	I						0
6	S	3×10^{-2}	0,75	0,25	0,13	1,55	30
	I	3×10^{-3}	0,60	0,25	0,07	1,60	70
7	S	3×10^{-2}	0,80	0,25	0,13	1,55	30
	I	3×10^{-3}	0,60	0,25	0,07	1,60	70
8	S	2×10^{-2}	0,70	0,25	0,13	1,55	30
	I	3×10^{-3}	0,60	0,25	0,07	1,60	70
9	S	1×10^{-2}	0,70	0,25	0,13	1,55	30
	I	3×10^{-3}	0,60	0,25	0,07	1,60	70

Obs: S= camada superior; I=camada inferior.

Tabela 4.16 Condição pluviométrica para simulação numérica.

Tempo (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...	40
Precipitação (mm/h)	5	10	15	20	15	15	10	10	5	5	0	0	...	0

Os Casos 3, 8 e 9 possuem os mesmo valores dos parâmetros exceto K_s da camada superior. Os valores de K_s são 3×10^{-2} ; 2×10^{-2} e 1×10^{-2} cm/s nos Casos 3, 8 e 9, respectivamente.

A condição pluviométrica é a mesma para todos os casos, sendo demonstrada na Tabela 4.16. Sua máxima intensidade de chuva é de 20 mm/h e sua precipitação total é 110 mm.

A Tabela 4.17 mostra todos os resultados da simulação numérica. O valor de descarga é expresso em mm/h, sendo medido a cada 20 minutos, após o início da chuva.

O tempo e o valor de descarga no pico do hidrograma, em cada caso, são mostrados na Tabela 4.18. Usando os dados desta tabela pode se obter uma relação negativa entre o tempo e a descarga no pico do hidrograma (Figura 4.8). Quando a ocorrência do pico do hidrograma é demorada, o valor do pico (valor da descarga máxima) se reduz. Este fenômeno é comumente observado a campo em bacias hidrográficas, podendo-se dizer que, na área de hidrologia, o atraso do pico do hidrograma indica menor possibilidade de enchente em tais bacias.

A Figura 4.9 mostra uma comparação dos hidrogramas dos Casos 1, 2, 3, 4 e 5. No Caso 1 usou-se um regolito com uma camada, sem influência de minhocas. Nos demais casos, existe uma camada superior que recebeu influência das minhocas, aumentando a espessura desta camada gradativamente em cada caso até o Caso 5, constituído somente pela camada que recebeu tal influência. Claramente observa-se que as minhocas alteram a forma do hidrograma, sendo que o pico aumentou e o tempo para se atingir o pico diminuiu. Sob o ponto de vista hidrológico, as minhocas pioram os comportamentos do escoamento no caso em que o *throughflow* ou escoamento subsuperficial se domina no processo chuva-vazão e não ocorre escoamento superficial.

Na Figura 4.10, os Casos 3, 6 e 7 têm as mesmas características do solo, exceto o valor de θ_s que é de 0,7; 0,75 e 0,8, respectivamente. Valores maiores de θ_s reduzem o pico e atrasam o tempo para este ser atingido.

Na Figura 4.11, os Casos 3, 8 e 9 têm as mesmas características do solo, exceto o valor de K_s que é de 3×10^{-2} ; 2×10^{-2} e 1×10^{-2} cm/s, respectivamente. Valores menores de K_s , de maneira semelhante a θ_s , reduzem o pico e atrasam o tempo para este ser atingido.

Portanto, a forma do hidrograma depende da relação entre as mudanças de K_s e θ_s , ou seja, se as minhocas provocarem um pequeno aumento em K_s ou um elevado aumento em θ_s , haverá um baixo pico do hidrograma. Caso ocorra o contrário, elevado aumento em K_s ou um pequeno aumento em θ_s , este pico aumenta.

Esta discussão acima mencionada está baseada nos resultados da simulação numérica que considerou que a condição hídrica inicial do solo seja constante para todos os casos e mantendo um estado estático da água do solo. Como mostrado na Tabela 4.14, as minhocas aumentaram a biomassa das folhas da bracatinga. Segundo TSUKAMOTO e OHTA (1984), quanto maior a biomassa presente, maior será a evapotranspiração da floresta. Portanto, a

Tabela 4.17 Descarga na coluna de solo na simulação numérica.

Tempo (hora)	descarga (mm/h)								
	Caso1	Caso2	Caso3	Caso4	Caso5	Caso6	Caso7	Caso8	Caso9
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,33	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,67	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
7,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
7,33	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
7,67	0,000	0,000	0,000	0,002	0,071	0,000	0,000	0,000	0,000
8,00	0,002	0,001	0,003	0,015	0,398	0,000	0,000	0,000	0,000
8,33	0,016	0,014	0,025	0,101	1,469	0,001	0,000	0,003	0,000
8,67	0,103	0,099	0,161	0,478	3,563	0,011	0,001	0,025	0,000
9,00	0,467	0,466	0,698	1,584	6,011	0,071	0,005	0,146	0,004
9,33	1,489	1,532	2,087	3,624	7,903	0,325	0,030	0,605	0,024
9,67	3,337	3,481	4,276	5,905	8,985	1,096	0,144	1,789	0,120
10,00	5,373	5,604	6,328	7,522	9,417	2,652	0,527	3,722	0,457
10,33	6,788	7,046	7,555	8,299	9,420	4,603	1,452	5,644	1,301
10,67	7,459	7,710	8,041	8,502	9,179	6,157	2,950	6,890	2,727
11,00	7,641	7,875	8,094	8,400	8,820	7,025	4,551	7,458	4,309
11,33	7,566	7,784	7,937	8,156	8,420	7,370	5,750	7,598	5,528
11,67	7,373	7,575	7,688	7,856	8,019	7,411	6,436	7,517	6,241
12,00	7,126	7,313	7,400	7,537	7,633	7,292	6,736	7,326	6,561
12,33	6,854	7,025	7,095	7,212	7,260	7,088	6,791	7,780	6,635
12,67	6,568	6,722	6,781	6,885	6,898	6,836	6,699	6,806	6,562
13,00	6,276	6,413	6,464	6,559	6,544	6,558	6,522	6,517	6,405
13,33	5,983	6,105	6,150	6,237	6,199	6,268	6,296	6,223	6,198
13,67	5,696	5,804	5,844	5,925	5,865	5,978	6,047	5,930	5,966
14,00	5,418	5,514	5,549	5,624	5,547	5,693	5,789	5,646	5,722
14,33	5,153	5,238	5,269	5,338	5,245	5,419	5,532	5,372	5,477
14,67	4,902	4,977	5,005	5,068	4,962	5,157	5,281	5,111	5,236
15,00	4,665	4,733	4,758	4,815	4,697	4,910	5,041	4,865	5,002
15,33	4,443	4,504	4,526	4,578	4,450	4,678	4,812	4,634	4,779
15,67	4,236	4,290	4,310	4,356	4,221	4,460	4,596	4,418	4,568
16,00	4,043	4,092	4,108	4,150	4,008	4,257	4,393	4,215	4,368
16,33	3,862	3,906	3,921	3,957	3,810	4,067	4,202	4,026	4,179
16,67	3,694	3,734	3,746	3,778	3,627	3,889	4,023	3,849	4,002
17,00	3,537	3,573	3,583	3,611	3,457	3,723	3,855	3,684	3,836
17,33	3,390	3,423	3,432	3,456	3,299	3,568	3,698	3,530	3,680
17,67	3,253	3,283	3,290	3,311	3,153	3,423	3,551	3,386	3,533
18,00	3,125	3,152	3,157	3,175	3,016	3,288	3,413	3,251	3,396
18,33	3,005	3,029	3,033	3,048	2,889	3,161	3,283	3,125	3,267
18,67	2,892	2,915	2,917	2,929	2,770	3,041	3,161	3,006	3,145
19,00	2,786	2,807	2,808	2,817	2,659	2,929	3,047	2,895	3,031
19,33	2,686	2,705	2,706	2,713	2,555	2,824	2,939	2,790	2,923
19,67	2,593	2,610	2,609	2,614	2,457	2,725	2,837	2,691	2,822
20,00	2,504	2,520	2,518	2,521	2,366	2,631	2,741	2,599	2,726
20,33	2,421	2,436	2,433	2,434	2,280	2,546	2,651	2,511	2,636
20,67	2,342	2,356	2,352	2,352	2,199	2,460	2,565	2,428	2,550
21,00	2,268	2,280	2,276	2,274	2,123	2,381	2,484	2,350	2,469
21,33	2,197	2,208	2,203	2,200	2,051	2,306	2,407	2,276	2,392
21,67	2,130	2,140	2,135	2,130	1,983	2,235	2,334	2,205	2,320
22,00	2,067	2,076	2,070	2,064	1,918	2,168	2,265	2,139	2,250
22,33	2,006	2,014	2,008	2,001	1,857	2,104	2,199	2,075	2,185
22,67	1,949	1,956	1,949	1,941	1,799	2,044	2,136	2,015	2,122
23,00	1,894	1,901	1,893	1,885	1,745	1,986	2,077	1,958	2,062
23,33	1,842	1,848	1,840	1,831	1,692	1,931	2,020	1,903	2,006
23,67	1,792	1,798	1,790	1,779	1,643	1,878	1,965	1,851	1,951

Continuação

Tempo (hora)	descarga (mm/h)								
	Caso1	Caso2	Caso3	Caso4	Caso5	Caso6	Caso7	Caso8	Caso9
24,00	1,745	1,750	1,741	1,730	1,596	1,828	1,913	1,801	1,900
24,33	1,699	1,704	1,695	1,683	1,551	1,780	1,864	1,754	1,850
24,67	1,656	1,660	1,651	1,638	1,508	1,734	1,816	1,708	1,803
25,00	1,614	1,618	1,608	1,595	1,467	1,690	1,771	1,665	1,758
25,33	1,575	1,577	1,568	1,554	1,428	1,648	1,727	1,623	1,714
25,67	1,536	1,539	1,529	1,515	1,390	1,608	1,686	1,583	1,673
26,00	1,500	1,502	1,492	1,478	1,354	1,569	1,646	1,545	1,633
26,33	1,465	1,466	1,456	1,441	1,320	1,532	1,607	1,508	1,594
26,67	1,431	1,432	1,422	1,407	1,287	1,497	1,570	1,473	1,558
27,00	1,398	1,399	1,389	1,374	1,256	1,462	1,535	1,439	1,522
27,33	1,367	1,368	1,357	1,342	1,225	1,429	1,501	1,406	1,488
27,67	1,337	1,337	1,327	1,311	1,196	1,398	1,468	1,375	1,455
28,00	1,308	1,308	1,298	1,281	1,168	1,367	1,436	1,345	1,524
28,33	1,280	1,280	1,269	1,253	1,142	1,337	1,405	1,316	1,393
28,67	1,253	1,253	1,242	1,225	1,116	1,309	1,376	1,288	1,364
29,00	1,227	1,227	1,216	1,199	1,091	1,282	1,348	1,260	1,336
29,33	1,202	1,201	1,190	1,173	1,067	1,256	1,320	1,234	1,308
29,67	1,178	1,177	1,166	1,149	1,044	1,230	1,294	1,209	1,282
30,00	1,155	1,153	1,142	1,125	1,021	1,205	1,268	1,185	1,257
30,33	1,132	1,130	1,119	1,102	1,000	1,182	1,243	1,161	1,232
30,67	1,110	1,108	1,097	1,080	0,979	1,159	1,219	1,138	1,208
31,00	1,089	1,087	1,076	1,058	0,959	1,136	1,196	1,116	1,185
31,33	1,068	1,066	1,055	1,037	0,939	1,115	1,174	1,095	1,163
31,67	1,049	1,046	1,035	1,017	0,921	1,094	1,152	1,074	1,141
32,00	1,029	1,027	1,016	0,998	0,902	1,074	1,131	1,054	1,120
32,33	1,011	1,008	0,997	0,979	0,885	1,054	1,110	1,035	1,100
32,67	0,993	0,990	0,979	0,961	0,868	1,035	1,091	1,016	1,080
33,00	0,975	0,972	0,961	0,943	0,851	1,017	1,071	0,998	1,061
33,33	0,958	0,955	0,944	0,926	0,835	0,999	1,053	0,980	1,043
33,67	0,942	0,938	0,927	0,909	0,820	0,981	1,035	0,963	1,025
34,00	0,925	0,922	0,911	0,893	0,805	0,964	1,017	0,947	1,007
34,33	0,910	0,907	0,896	0,877	0,790	0,948	1,000	0,930	0,990
34,67	0,895	0,891	0,880	0,862	0,776	0,932	0,983	0,915	0,974
35,00	0,880	0,876	0,866	0,847	0,762	0,917	0,967	0,899	0,958
35,33	0,866	0,862	0,851	0,833	0,749	0,901	0,951	0,884	0,942
35,67	0,852	0,848	0,837	0,819	0,736	0,887	0,936	0,870	0,927
36,00	0,838	0,834	0,823	0,805	0,723	0,873	0,921	0,856	0,912
36,33	0,825	0,821	0,810	0,792	0,711	0,859	0,907	0,842	0,898
36,67	0,812	0,808	0,797	0,779	0,699	0,845	0,893	0,829	0,884
37,00	0,799	0,795	0,785	0,766	0,687	0,832	0,879	0,816	0,870
37,33	0,787	0,783	0,772	0,754	0,676	0,819	0,866	0,803	0,857
37,67	0,775	0,771	0,760	0,742	0,665	0,807	0,852	0,791	0,844
38,00	0,764	0,759	0,749	0,731	0,654	0,794	0,840	0,779	0,831
38,33	0,752	0,748	0,738	0,719	0,644	0,783	0,827	0,767	0,819
38,67	0,741	0,737	0,726	0,708	0,634	0,771	0,815	0,756	0,807
39,00	0,730	0,726	0,716	0,697	0,624	0,760	0,803	0,745	0,795
39,33	0,720	0,715	0,705	0,687	0,614	0,749	0,792	0,734	0,784
39,67	0,710	0,705	0,695	0,677	0,605	0,738	0,781	0,723	0,773
40,00	0,700	0,695	0,685	0,667	0,596	0,727	0,770	0,713	0,762

Tabela 4.18 Tempo, em hora, e descarga, mm/h, em pico no hidrograma obtido pela simulação numérica.

	Caso1	Caso2	Caso3	Caso4	Caso5	Caso6	Caso7	Caso8	Caso9
Tempo	11,03	11,00	10,88	10,68	10,17	11,57	12,27	11,33	12,30
Descarga	7,642	7,875	8,109	8,503	9,459	7,420	6,794	7,598	6,635

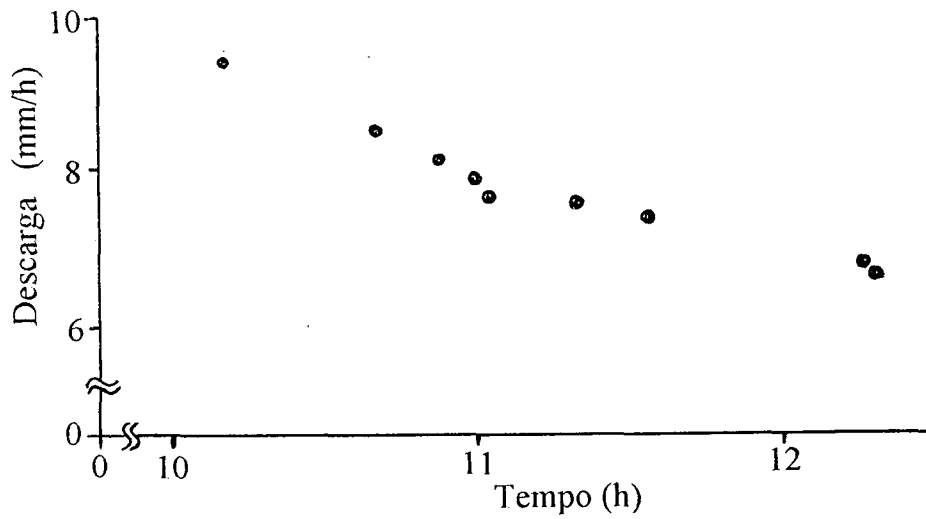


Figura 4.8 Relação entre o tempo e a descarga no pico do hidrograma

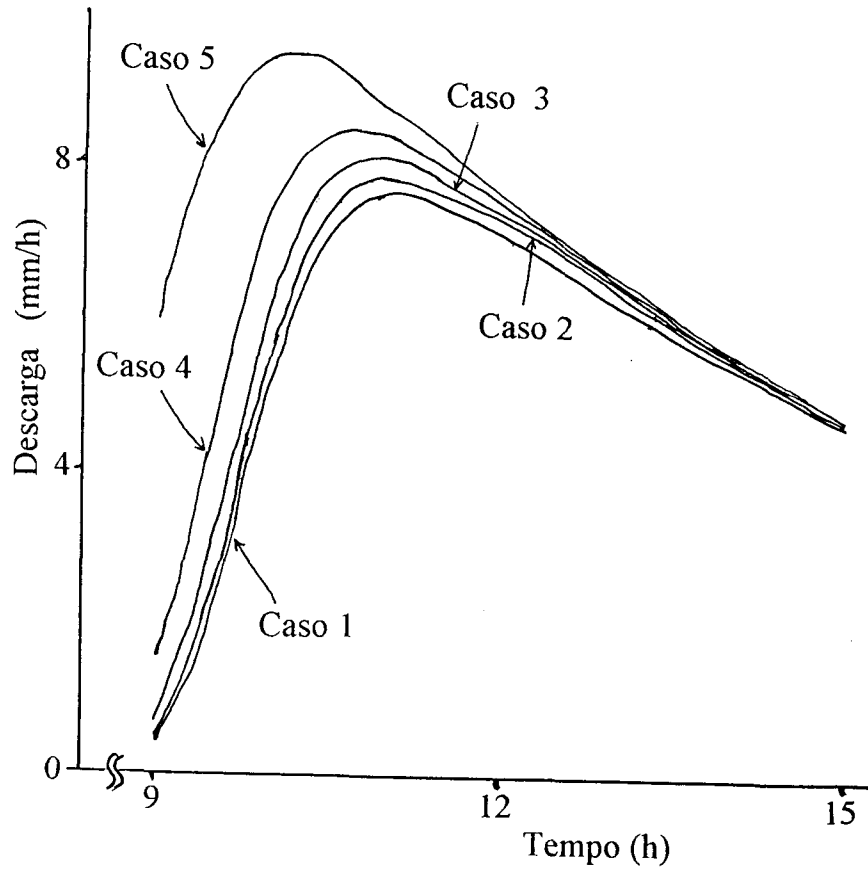


Figura 4.9 Hidrogramas dos Casos 1, 2, 3, 4 e 5

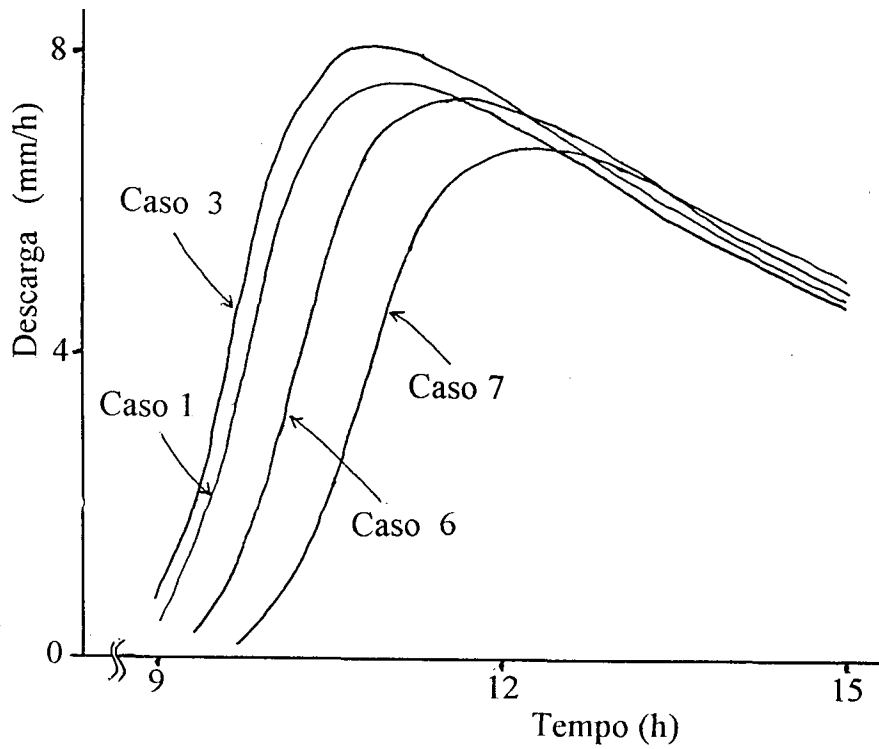


Figura 4.10 Hidrogramas dos Casos 1, 3, 6 e 7

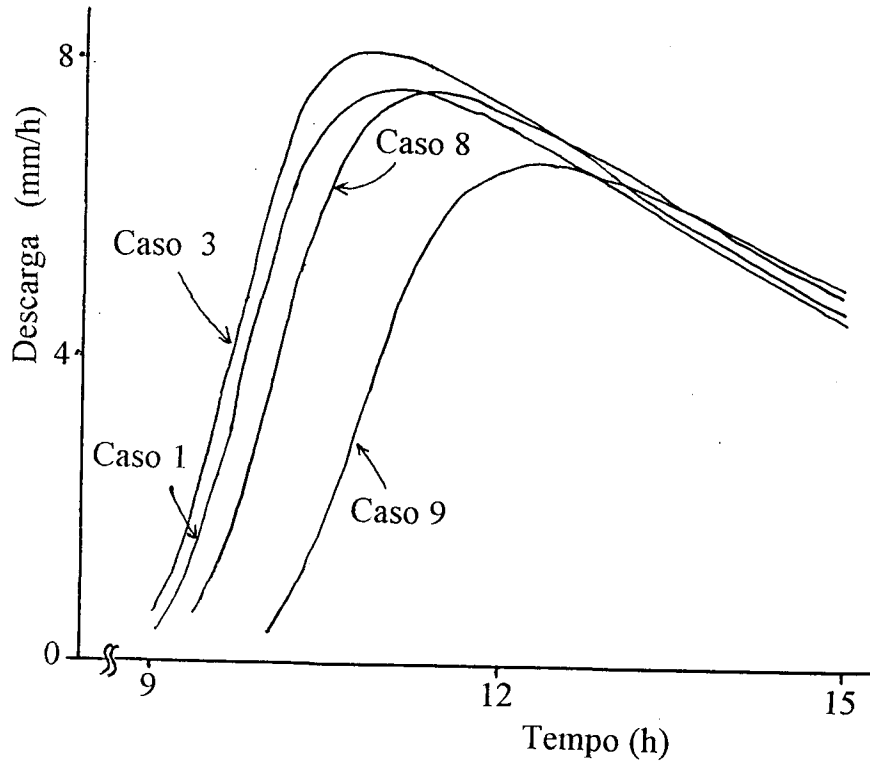


Figura 4.11 Hidrogramas dos Casos 1, 3, 8 e 9

presença de bracinga em solos com minhocas irá aumentar a evapotranspiração. Isto causa a perda de água, tornando mais seco o solo. As minhocas, desta forma, mantendo o solo mais seco, aumentarão a capacidade de armazenamento da água deste solo, possibilitando a redução do pico do hidrograma.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Foi observada, a campo, a influência das minhocas sobre as propriedades hidráulicas do solo e sobre o crescimento da bracatinga. Além disso, baseado em dados obtidos indiretamente pela teoria de VAN GENUCHTEN (1980) sobre as propriedades hidráulicas do solo, foi analisada, pela simulação numérica, a ação das minhocas sobre o movimento da água no solo. Os resultados obtidos na presente investigação permitem as seguintes conclusões:

1. As minhocas alteraram as propriedades hidráulicas do solo até 30 cm, sendo que sua influência diminui com o aumento da profundidade.
2. Em geral, quanto maior a população de minhocas, maiores serão as alterações destas propriedades.
3. K_s e θ_s foram, entre os parâmetros analisados, os mais influenciados pela ação das minhocas. Já α e n foram influenciados em pequeníssimo grau, enquanto θ_r não sofreu nenhuma alteração.
4. As minhocas aumentaram a porosidade, principalmente a constituída por poros de diâmetro equivalente do poro maior do que 0,06 mm. Em outras palavras, as porosidades-pequena, fina e micro, de acordo com a classificação de TAKESHITA (1985), não receberam nenhuma influência.
5. As minhocas aumentaram a aeração do solo sendo que maiores populações criaram maiores aerações.
6. O potencial de recarga da água para o rio foi melhorado pela ação das minhocas, que causaram um aumento no valor de $\theta_{0,7} - \theta_{2,7}$.
7. O valor da porosidade gerada pelas galerias das minhocas foi aproximadamente calculado como 0,01 a 0,03.
8. As minhocas aumentaram o valor do D_M , diminuindo o valor de $|\psi_{MÁX}|$.
9. O crescimento em altura e o peso seco da bracatinga foi maior nos tratamentos com minhoca, o que pode ser associado às melhorias na aeração e condição hídrica do solo causadas por tais organismos.
10. Houve, pela ação das minhocas, um aumento no pico do hidrograma, obtido por simulação numérica, onde água subsuperficial é dominante no processo chuva-vazão. Este aumento normalmente não é favorável para manejo de bacias hidrográficas. Entretanto, o fenômeno do aumento do pico depende da relação de aumento de K_s e θ_s . Se as minhocas provocarem um pequeno aumento em K_s ou um elevado aumento em θ_s , haverá uma redução do pico. Caso ocorra o contrário, um elevado aumento em K_s ou um pequeno aumento em θ_s , este pico aumenta.

5.2 RECOMENDAÇÕES

As minhocas são consideradas normalmente, agentes melhoradores do solo, como provou este estudo. As melhorias na aeração e condições hídricas do solo, com o consequente aumento do crescimento da bracatinga, servem para demonstrar isto.

Deve-se porém fazer uma consideração quanto ao aspecto hidrológico, onde as minhocas podem nem sempre desempenhar um papel positivo. Este seria o caso de determinados solos, com alta permeabilidade, onde sua ação seria prejudicial. Antes de se efetuar a inoculação de minhocas em um solo, deve-se pesquisar suas propriedades hidráulicas.

Um fator não analisado por este estudo, foi a influência das minhocas sobre as propriedades químicas e biológicas do solo. Uma análise completa exige a avaliação de tal influência, o que deverá ser abordado em futuros trabalhos.

Além disso, cada espécie de minhoca possui características ecológicas próprias. Como este estudo objetivou somente *Amyntas* spp. Rosa, 1891, outros trabalhos deverão contemplar espécies distintas desta, visando desta maneira uma utilização adequada.

ANEXO - EQUAÇÕES DE VAN GENUCHTEN (1980)

A teoria de MUALEM (1976) derivou uma equação para prognosticar a condutividade hidráulica relativa K_r , que seria a seguinte:

$$K_r = \frac{K}{K_s} = S^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\int_0^s \frac{1}{\psi(\theta)} d\theta}{\int_0^1 \frac{1}{\psi(\theta)} d\theta} \right]^2 \quad (A1)$$

onde K_s é condutividade hidráulica saturada; S é saturação efetiva definida por COREY (1954) como:

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (A2)$$

onde θ_r é umidade residual; θ_s é umidade saturada.

Para resolver a Eq. (A1), VAN GENUCHTEN (1980) propõe a seguinte função de $S(\psi)$:

$$S(\psi) = \left[\frac{1}{1 + (\alpha|\psi|)^n} \right]^m \quad (A3)$$

onde α , m e n são parâmetros.

Quando $m=1$, a Eq. (A3) passa a ser a equação de AHUJA e SWARTZENDRUBER (1972). Juntando as Eqs. (A2) e (A3), obtêm-se:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha|\psi|)^n} \right]^m \quad (A4)$$

ou seja:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\psi|)^n\right]^m} \quad (\text{A5})$$

No caso de ψ ,

$$\psi(\theta) = \frac{\left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r}\right)^{\frac{1}{m}} - 1\right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} = \frac{\left[S^{-\frac{1}{m}} - 1\right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad (\text{A6})$$

ou seja,

$$\psi(\theta) = \psi(S) = \frac{\left[\frac{1 - S^{\frac{1}{m}}}{S^{\frac{1}{m}}}\right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad (\text{A7})$$

Substituindo a Eq. (A7) na Eq. (A1):

$$Kr(S) = S^{\frac{1}{2}} \frac{\left[\frac{1}{\alpha} \int_0^S \frac{S^{\frac{1}{m}}}{1 - S^{\frac{1}{m}}}\right]^{\frac{1}{n}} dS}{\left[\frac{1}{\alpha} \int_0^1 \frac{S^{\frac{1}{m}}}{1 - S^{\frac{1}{m}}}\right]^{\frac{1}{n}} dS} = S^{\frac{1}{2}} \left[\frac{f(S)}{f(1)}\right]^2 \quad (\text{A8})$$

onde:

$$f(S) = \int_0^S \left[\frac{S^{\frac{1}{m}}}{1 - S^{\frac{1}{m}}}\right]^{\frac{1}{n}} dS = \int_0^S \left[\frac{x^{\frac{1}{m}}}{1 - x^{\frac{1}{m}}}\right]^{\frac{1}{n}} dx \quad (\text{A9})$$

Substituição de $x = y^m$ na Eq. (A9) conduz:

$$f(S) = \int_0^{\frac{1}{S^m}} \left[\frac{y}{1-y} \right]^{\frac{1}{n}} m y^{m-1} dy = m \int_0^{\frac{1}{S^m}} y^{m-1+\frac{1}{n}} \cdot (1-y)^{-\frac{1}{n}} dy \quad (\text{A10})$$

Segundo VAN GENUCHTEN (1980),

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{A11})$$

então a Eq. (A10) torna-se:

$$f(S) = m \int_0^{\frac{1}{S^m}} (1-y)^{m-1} dy = m \left[\frac{(1-y)^m}{m} \right]_0^{\frac{1}{S^m}} = \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m - 1 \quad (\text{A12})$$

$$\text{Portanto: } f(1) = -1 \quad (\text{A13})$$

Substituindo as Eqs. (A12) e (A13) na Eq. (A8), obtém-se

$$K_r(S) = S^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad \left(\begin{array}{l} m = 1 - \frac{1}{n} \\ 0 < m < 1 \end{array} \right) \quad (\text{A14})$$

Consultando as Eqs. (A1), (A2) e (A14), obtém-se

$$\begin{aligned} K(\theta) &= K_s \cdot S^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \\ &= K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \end{aligned} \quad (\text{A15})$$

Substituindo a Eq. (A4) na (A15), têm-se:

$$K(\psi) = K_s \frac{\left\{ 1 - (\alpha \psi)^{n-1} \left[1 + (\alpha |\psi|^n) \right]^{-m} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha |\psi|^n) \right]^{\frac{m}{2}}} \quad (\text{A16})$$

Definindo $C(\psi) = d\theta/d\psi$ como capacidade específica de água (*specific water capacity*) e derivando a Eq. (A5), consegue-se

$$C(\psi) = \frac{-m \cdot n \cdot \alpha^n (\theta_s - \theta_r) \cdot (|\psi|)^{n-1}}{\left[1 + (\alpha |\psi|^n) \right]^{m+1}} \quad (\text{A17})$$

Derivando a Eq. (A6), obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{d\theta} &= \frac{d\psi}{dS} \cdot \frac{dS}{d\theta} = \frac{1}{\alpha} \left(-\frac{1}{m} \right) \cdot S^{-\frac{1}{m}-1} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(S^{\frac{1}{m}-1} - 1 \right)^{\frac{1}{n}-1} \cdot \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \\ &= \frac{m-1}{\alpha m (\theta_s - \theta_r)} \cdot S^{-\frac{1}{m}-1} \cdot \left(S^{\frac{1}{m}-1} - 1 \right)^{-m} \end{aligned} \quad (\text{A18})$$

Como $0 < m < 1$, $\left| \frac{d\psi}{d\theta} \right|$ fica:

$$\frac{d\psi}{d\theta} = \frac{1-m}{\alpha \cdot m \cdot (\theta_s - \theta_r)} \cdot S^{-\frac{1}{m}-1} \cdot \left(S^{\frac{1}{m}-1} - 1 \right)^{-m} \quad (\text{A19})$$

Devido à condutividade hidráulica e a curva de retenção, pode-se derivar uma expressão de difusividade definida por CHILDS e COLLIS-GEORGE (1950) como:

$$D(\theta) = K(\theta) \cdot \left| \frac{d\psi}{d\theta} \right| \quad (\text{A20})$$

Substituindo as Eqs. (A15) e (A19) na Eq. (A20), obtém-se:

$$\begin{aligned}
D(\theta) &= D(S) \\
&= \frac{(1-m)}{\alpha \cdot m \cdot (\theta_s - \theta_r)} \cdot S^{\frac{1}{m} - 1} \cdot \left(S^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^m \cdot K_s \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \\
&= \frac{(1-m) \cdot K_s}{\alpha \cdot m \cdot (\theta_s - \theta_r)} \cdot S^{\frac{1}{2} - \frac{1}{m}} \cdot \frac{1 - 2 \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m + \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^{2m}}{S \left(S^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^m} \\
&= \frac{(1-m) \cdot K_s}{\alpha \cdot m \cdot (\theta_s - \theta_r)} \cdot S^{\frac{1}{2} - \frac{1}{m}} \cdot \frac{1 - 2 \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m + \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^{2m}}{\frac{\left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m}{S}} \\
&= \frac{(1-m) \cdot K_s}{\alpha \cdot m \cdot (\theta_s - \theta_r)} \cdot S^{\frac{1}{2} - \frac{1}{m}} \cdot \left[\left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^{-m} + \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m - 2 \right] \tag{A21}
\end{aligned}$$

Em geral, as Eqs. (A5), (A6), (A15), (A16), (A17) e (A21) são conhecidas como as equações de VAN GENUCHTEN (1980).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHUJA, L.R.; SWARTZENDRUBER, D. An improved form of soil-water diffusivity function. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, v.36, p.9-14, 1972.
- AINA, P.O. Contribution of earthworms to porosity and water infiltration in a tropical soil under forest and long-term cultivation. *Pedobiologia*, Jena, v.26, p.131-136, 1984.
- ALDAG, R.; GRAFF, O. Einfluss der Regenwurmtätigkeit auf Proteingehalt und Proteinqualität junger Haferpflanzen. *Landwirtschaftliche Forschung*, Frankfurt, v.31/II, p.277-284, 1975.
- ATLAVINYIE, O.; VANAGAS, J. The effect of earthworms on the quality of barley and rye grain. *Pedobiologia*, Jena, v.23, p.256-262, 1982.
- AUBERTIN, G.M. Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement. USDA Forest Service Res. *Paper Northeast Forest Exp. Sta.*, Upper Darby, n.NE-192, 1971, 33p.
- BAL, L. *Zoological ripening of soils*. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1982, 365p.
- BARLEY, K.P. Earthworms and soil fertility. 4. The influence of earthworms on the physical properties of a red-brown earth. *Aust. J. Agric. Res.*, East Melbourne, v.10, p.371-376, 1959.
- BAUMGARTNER, A. Energetic base for differential vaporization from forest and agricultural lands. In: SOPPER, W.E.; LULL, H.W. (eds.) *International Symposium on Forest Hydrology*. New York: Pergamon, 1967. p.381-389.
- BAVER, L.D.; FARNSWORTH, R.B. Soil structure effects in the growth of sugar beets. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, v.5, p.45-48, 1940.
- BETSON, R.P. What is watershed runoff? *J. Geophys. Res.*, Washington, v.69, p.1541-1552, 1964.
- BEVEN, K.; GERMANN, P. Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.*, Washington, v.18, p.1311-1325, 1982.
- BEZBORODOV, G.A.; KHALBAYEVA, R.A. Effect of earthworms on the agrochemical and hydrophysical properties of irrigated sierozems. *Soviet Soil Sci.*, New York, v.22, n.5, p.30-35, 1990.
- BOLTON, P.J.; PHILLIPSON, J. Burrowing, feeding, egestion and energy budgets of *Allolobophora rosea* (Savigny) (Lumbricidae). *Oecologia*, Berlin, v.23, p.225-245, 1976.
- BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.55, p.3-23, 1982.
- BOSTRON, U.; LOFS-HOLMIN, A. Growth of earthworms (*Allolobophora caliginosa*) fed shoots and roots of barley, meadow fescue and lucerne. Studies in relation to

- particle size, protein, crude fiber content and toxicity. *Pedobiologia*, Jena, v.29, p.1-12, 1986.
- BOUMA, J.; JONGERIUS, A.; BOERSMA, O.; JAGER, A.; SCHOONDERBEEK, D. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.41, p.945-950, 1977.
- BRADY, N.C. *The nature and properties of soils*. New York: MacMillan, 1984. 750p.
- BREWER, R. *Fabric and mineral analysis of soils*. New York: John-Wiley & Sons, 1964. 470p.
- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. *Hydraulic properties of porous media*. Fort Collins: Colorado State Univ., Civil Engineering Dep., 1964. 27p. (Hydrology Paper n.3).
- BUCKINGHAM, E. *Studies on the movement of soil moisture*. Washington: US. Dept. Agric., 1907. 61p. (Bull. n.38).
- CAMPBELL, G.S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, Baltimore, v.117, p.311-314, 1974.
- CAPRA, F. *O Tao da Física*. São Paulo: Cultrix, 1983. 274p.
- CARDOSO, J. Bracatinga. *Brasil Madeira*, Curitiba, v.3, n.33, p.10-11, 1974.
- CARSON, R. *Primavera Silenciosa*. São Paulo: Melhoramentos, 1965. 305p.
- CARTER, A.; HEINONEN, J.; DE VRIES, J. Earthworms and water movement. *Pedobiologia*, Jena, v.23, p.395-397, 1982.
- CHILDS, E.C. The use of soil moisture characteristics in soil studies. *Soil Sci.*, Baltimore, v.50, p.239-252, 1940.
- CHILDS, E.C.; COLLIS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. *Proc. Roy. Soc. London*, London, n.201A, p.392-405, 1950.
- CHOW, V.T. Hydrology and its development. In: CHOW, V.T. (ed.) *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw Hill, 1964. p.1-21.
- COLLIS-GEORGE, N.; DAVEY, B.G.; SMILES, D.E. *Fundamentos de agricultura moderna. 1. Suelo-atmosfera y fertilizantes*. Barcelona: Aedes, 1971. 334p.
- COREY, A.T. The interrelation between gas and oil relative permeabilities. *Oil Producer's Monthly*, New York, v.19, p.38-41, 1954.
- CRANK, J.; NICOLSON, P. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat conduction type. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, Cambridge, v.43, p.50-67, 1947.
- DARWIN, C. *The formation of vegetable mould through the action of worms, with observations on their habits*. London: Murray, 1881. 326p.
- DE VLEESCHAUWER, D.; LAL, R. Properties of worm casts in some tropical soils. *Soil Sci.*, Baltimore, v.132, p.175-181, 1981.
- DIXON, R.M.; PETERSON, A.E. Water infiltration control: a channel system concept. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, v.35, p.968-973, 1971.
- DOBROVOL'SKII, G.V.; TITKOVA, N.F. Characteristics of the structure of soils of bottomland oak stands. *Pochvovedenie*, Moscow, n.1, p.15-25, 1960.

- DUFF, H.A. Pasture improvement in low altitude tussock and shrub-land. *N.Z. Grassl. Assoc. Proc.*, Wellington, v.20, p.70-79, 1958.
- DUNNE, T. Field studies of hillslope flow processes. In: KIRKBY, M.J. (ed.) *Hillslope Hydrology*. Chichester: John Wiley, 1978. p.227-293.
- DUNNE, T.; BLACK, R.D. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resour. Res.*, Washington, v.6, p.478-490, 1970a.
- DUNNE, T.; BLACK, R.D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resour. Res.*, Washington, v.6, p.1296-1311, 1970b.
- DUNNE, T.; LEOPOLD, L.B. *Water in Environmental Planning*. San Francisco: Freeman, 1978. 818p.
- EDWARDS, C.A.; LOFTY, J.R. *Biology of earthworms*. 2nd ed. London: Chapman and Hall, 1977. 333p.
- EDWARDS, C.A.; LOFTY, J.R. Effects of earthworm inoculation upon the root growth of direct drilled cereals. *J. Appl. Ecol.*, Oxford, v.17, p.533-543, 1980.
- EDWARDS, W.M.; NORTON, L.D.; REDMOND, C.E. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.52, p.483-487, 1988.
- EDWARDS, W.M.; SHIPITALO, M.J.; OWENS, L.B.; NORTON, L.D. Water and nitrate movement in earthworm burrows within long-term no till cornfields. *J. Soil Water Conserv.*, Ankeny, v.44, p.240-243, 1989.
- EDWARDS, W.M.; SHIPITALO, M.J.; OWENS, L.B.; NORTON, L.D. Effect of *Lumbricus terrestris* L. burrows on hydrology of continuous no-till corn fields. *Geoderma*, Amsterdam, v.46, p.73-84, 1990.
- EDWARDS, W.M.; SHIPITALO, M.J.; TRAINA, S.J.; EDWARDS, C.A.; OWENS, L.B. Role of *Lumbricus terrestris* (L.) burrows on quality of infiltrating water. *Soil Biol. Biochem.*, Elmsford, v.24, p.1555-1561, 1992.
- EDWARDS, W.M.; VAN DER PLOEG, R.R.; EHLERS, W. A numerical study of the effects on noncapillary-sized pores upon infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.43, p.851-856, 1979.
- EHLERS, W. Gesamtporenvolumen und Porengroessenverteilung in unbearbeiteten und bearbeiteten Loessboeden. *Z. Pflanzenernaehr Bodenkd.*, Weinheim, v.134, p.193-207, 1973.
- EHLERS, W. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.*, Baltimore, v.119, p.242-249, 1975.
- EMBRAPA, CNPF. *Manual técnico da bracatinga (Mimosa scabrella Benth)*. Curitiba, 1988. 70p. (Documentos; 20).
- EMBRAPA-SNLCS. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, 1979a. 313p.
- EMBRAPA-SNLCS. *Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos*. Rio de Janeiro, 1979b. 83p. (SNLCS. Série Miscelânea, 1).

- FARLOW, S.J. **Partial Differential Equations for Scientists and Engineers.** New York: John Wiley and Sons, 1982. 402p.
- FEDERER, C.A. Forest transpiration greatly speeds streamflow recession. **Water Resour. Res.**, Washington, v.9, p.1599-1604, 1973.
- FLETCHER, P.W.; LULL, H.W. Soil moisture depletion by a hardwood forest during drouth years. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v.27, p.94-98, 1963.
- FOSGATE, O.T.; BABB, M.R. Biodegradation of animal waste by *Lumbricus terrestris*. **J. Dairy Sci.**, Champain, v.55, p.870-872, 1972.
- FREEZE, R.A. The mechanism of natural ground-water recharge and discharge. 1. One-dimensional, vertical, unsteady, unsaturated flow above a recharging or discharging ground-water flow system. **Water Resour. Res.**, Washington, v.5, p.153-171, 1969.
- FREEZE, R.A. Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. **Water Resour. Res.**, Washington, v.7, p.347- 366, 1971.
- FREEZE, R.A. Role of subsurface flow in generating surface runoff. 1. Base flow contributions to channel flow. **Water Resour. Res.**, Washington, v.8, p.609-623, 1972a.
- FREEZE, R.A. Role of subsurface flow in generating surface runoff. 2. Upstream source areas. **Water Resour. Res.**, Washington, v.8, p.1272- 1283, 1972b.
- FRIND, E.O.; VERGE, M.J. Three dimensional modeling of groundwater flow systems. **Water Resour. Res.**, Washington, v.14, p.844-856, 1978.
- FUKUSHIMA, Y. Hydrological effect of hillside works in granitic hilly mountains. In: ANNUAL MEETING OF THE JAPANESE FORESTRY SOCIETY (88: Kyoto: 1977). **Transactions.** Tokyo, 1977. p.391-393.
- FUKUSHIMA, Y. Influence of forestation on mountainside at granite highlands. **Water Sci.**, Tokyo, v.31, n.4, p.17-34, 1987.
- GERMANN, P.; BEVEN, K. Water flow in soil macropores. 1. An experimental approach. **J. Soil Sci.**, Oxford, v.32, p.1-13, 1981.
- GRAHAM, F.JR. **Since Silent Spring.** Boston: Houghton Mifflin, 1970. 333p.
- GUILD, W.J. McL. Variation in earthworm numbers within field populations. **J. Anim. Ecol.**, Oxford, v.21, p.169-181, 1952.
- GUREGHIAN, A.B. A two-dimensional finite element solution scheme for the saturated-unsaturated flow with applications to flow through ditch-drained soils. **J. Hydrol.**, Amsterdam, v.50, p.333-353, 1981.
- HAIMI, J.; HUHTA, V.; BOUCELHAM, M. Growth increase of birch seedling under the influence of earthworms - A laboratory study. **Soil Biol. Biochem.**, Elmsford, v.24, p.1525-1528, 1992.
- HATTORI, S. Forest influence on thermal environment. In: TSUKAMOTO, Y. (ed.) **Forest Hydrology.** Tokyo: Buneido, 1992. p.242-246.

- HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M.; TOUMA, J.; WIERENGA, P.J.; VACHAUD, G. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.41, p.285-294, 1977.
- HAZELHOFF, L.; VAN HOOFF, P.; IMESON, A.C.; KWAAD, F.J.P.M. The exposure of forest soil to erosion by earthworms. *Earth Surface Processes*, Sussex, v.6, p.235-250, 1981.
- HELMKE, P.A.; ROBARGE, W.P.; KOROTEV, R.L.; SCHOMBERG, P.J. Effects of soil applied sewage sludge on concentrations of elements in earthworms. *J. Environ. Qual.*, Madison, v.8, p.322-327, 1979.
- HEWLETT, J.D. Watershed management. USDA Forest Service **Report**. Southern Forest Experiment Station, Asheville, 1961a. p.61-66.
- HEWLETT, J.D. Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds. USDA Forest Service **Station Paper**. Southern Forest Experiment Station, Asheville, n.132, p.1-11, 1961b.
- HEWLETT, J.D.; HELVEY, J.D. Effects of forest clear-felling on the storm hydrograph. *Water Resour. Res.*, Washington, v.6, p.768-782, 1970.
- HEWLETT, J.D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY (1965: Pennsylvania). **Proceedings**. Pennsylvania State Univ., 1967. p.275-290.
- HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**. New York: Academic Press, 1980a. 413 p.
- HILLEL, D. **Applications of Soil Physics**. New York: Academic Press, 1980b. 385 p.
- HINO, M. Runoff Process. In: HINO, M.; OHTA, T.; SUNADA, K.; WATANABE, K. **Numerical forecast of floods. A first step**. Tokyo: Morikita Pub., 1989. p.14-40.
- HINO, M.; OHTA, T.; SUNADA, K.; WATANABE, K. **Numerical forecast of floods. A first step**. Tokyo: Morikita Pub., 1989. 252p.
- HOEKSEMA, K.J.; JONGERIUS, A. On the influence of earthworms on the soil structure in mulched orchards. In: INT. SYMP. SOIL STRUCT. (1958: Ghent). **Proceedings**, Ghent, 1959. p.188-194.
- HOOGERKAMP, M.; ROGAAR, H.; EIJSACKERS, H.J.P. Effect of earthworms on grassland on recently reclaimed polder soils in the Netherlands. In: SATCHELL, J.E. (ed.) **Earthworm ecology**. London: Chapman and Hall, 1983. p.85-105.
- HOPP, H. Earthworms fight erosion too. *Soil Conserv.*, Washington, v.11, p.252-254, 1946.
- HOPP, H. **Acção das minhocas no solo**. São Paulo: Nobel, 1985. 64p.
- HOPP, H.; SLATER, C.S. Influence of earthworms on soil productivity. *Soil Sci.*, Baltimore, v.66, p.421-428, 1948.
- HOPP, H.; SLATER, C.S. The effect of earthworms on the productivity of agricultural soil. *J. Agric. Res.*, Cambridge, v.78, p.325-339, 1949.

- HORTON, R.E. The rôle of infiltration in the hydrologic cycle. **Trans. Am. Geophys. Union**, Washington, v.12, p.189-202, 1931.
- HORTON, R.E. The rôle of infiltration in the hydrologic cycle. **Trans. Am. Geophys. Union**, Washington, v. 14, p.446-460, 1933.
- IRELAND, M.P. Heavy metal uptake and tissue distribution in earthworms. In: SATCHELL, J.E. (ed.) **Earthworm Ecology**. London: Chapman and Hall, 1983. p.247-265.
- JOSCHKO, M.; SÖCHTIG, W.; LARINK, O. Functional relationship between earthworm burrows and soil water movement in column experiments. **Soil Biol. Biochem.**, Elmsford, v.24, p.1545-1547, 1992.
- KAYANE, I. **Hydrology**. Tokyo: Taimeido, 1980. 272p.
- KIEHL, E.J. **Manual de Edafologia. Relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.
- KIRKBY, M.J. (ed.) **Hillslope Hydrology**. Chichester: John Wiley, 1978. 389p.
- KLADIVKO, E.J.; MACKAY, A.D.; BRADFORD, J.M. Earthworms as a factor in the reduction of soil crusting. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.50, p.191-196, 1986.
- KLUTE, A. A numerical method for solving flow equation for water in unsaturated materials. **Soil Sci.**, Baltimore, v.73, p.105-116, 1952.
- KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: Am. Soc. Agron., 1986. 1188p. (Agronomy monograph 9).
- KOBIYAMA, M.; USHIWATA, C.T.; BARCIK, C. Recuperação de áreas degradadas - Conceito, um exemplo e uma sugestão. **BIO**, Rio de Janeiro, Ano II, n.6, p.95-102, 1993.
- KRETZSCHMAR, A. Quantification écologique des galeries de lombriciens. Techniques et premières estimations. **Pedobiologia**, Jena, v.18, p.31-38, 1978.
- KRIVOLUTSKY, D.; TURCANINOVA, V.; MIKHALTSOVA, Z. Earthworms as bioindicators of radioactive soil pollution. **Pedobiologia**, Jena, v.23, p.263-265, 1982.
- LAL, R. Physical characteristics of soils of the tropics: Determination and management. In: LAL, R.; GREENLAND, D.J. (eds.) **Soil physical properties and crop production in the tropics**. New York: John Wiley, 1979. p.7-44.
- LAL, R.; Effects of macrofauna on soil properties in tropical ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.24, n.1-3, p.101-116, 1988.
- LAL, R.; AKINREMI, O.O. Physical properties of earthworm casts and surface soil as influenced by management. **Soil Sci.**, Baltimore, v.135, p.114-122, 1983.
- LAL, R.; CUMMINGS, D.J. Clearing a tropical forest. 1. Effects on soil and microclimate. **Field Crops Res.**, Amsterdam, v.2, p.91-107, 1979.
- LAL, R.; WILSON, G.F.; OKIGBO, B.N. No-till farming after various grasses and leguminous cover crops in tropical Alfisol. 1. Crop performance. **Field Crop Res.**, Amsterdam, v.1, p.71-84, 1978.
- LAVERACK, M.S. **The physiology of earthworms**. Oxford: Pergamon, 1963. 206p.

- LEE, K.E. Microrelief features in a humid tropical lowland area, New Guinea, and their relation to earthworm activity. *Aust. J. Soil Res.*, Melbourne, v.5, p.263-274, 1967.
- LEE, K.E. **Earthworms: Their ecology and relationships with soils and land use.** Sydney: Academic Press, 1985. 411p.
- LEWIS, D.T. Subgroup designation of three Udolls in southeastern Nebraska. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.41, p.940-945, 1977.
- LIKENS, G.E.; BORMANN, F.H.; PIERCE, R.S.; EATON, J.S.; JOHNSON, N.M. **Biogeochemistry of a Forested Ecosystem.** New York, Springer-Verlag, 1977. 146p.
- LIKENS, G.E.; BORMANN, F.H.; PIERCE, R.S.; REINERS, W.A. Recovery of a deforested ecosystem. *Science*, Washington, v.199, n.3, p.492-496, 1978.
- LINDEN, D.R.; DIXON, R.M. Soil air pressure effects on route and rate of infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.40, p.963-965, 1976.
- LOGSDON, S.D.; LINDEN, D.R. Interactions of earthworms with soil physical conditions influencing plant growth. *Soil Sci.*, Baltimore, v.154, p.330-337, 1992.
- LULL, H.W. Ecological and silvicultural aspects. In: CHOW, V.T. (ed.) **Handbook of applied hydrology.** New York: McGraw Hill, 1964. p.6.1-6.30.
- LUXMOORE, R.J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.45, p.671-672, 1981.
- MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná.** Curitiba: CODEPAR, 1968. 350p.
- MADGE, D.S. Field and laboratory studies on the activities of two species of tropical earthworms. *Pedobiologia*, Jena, v.9, p.188-214, 1969.
- MARSHALL, T.J. **Relations between water and soil.** Harpenden: Commonwealth Bureau of Soils, 1959. (Technical Commun., n.50)
- MARSHALL, V.G. Effects of soil arthropods and earthworms on the growth of black spruce. In: **COLLOQUIUM PEDOBIOLOGIE** (4: 1971:Paris). Paris: Institut National des Recherches Agricoles, 1971. p.109-117. (Publ.; 71-7).
- MOSLEY, M.P. Stream generation in a forested watershed, New Zealand. *Water Resour. Res.*, Washington, v.15, p.795-806, 1979.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, Washington, v.12, p.513-522, 1976.
- MURAI, H.; IWASAKI, Y. Studies on function of water and soil conservation based on forest land. 1. Influence of difference in forest condition upon water run-off, infiltration and soil erosion. *Bull. Jap. Gov. For. Exp. Sta.*, Tokyo, n.274, p.23-84, 1975.
- NAKANO, H. Effect on streamflow of forest cutting and change in regrowth on cut-over area. *Bull. Jap. Gov. For. Exp. Sta.*, Tokyo, n.240, p.1-249, 1971.
- NAKANO, H. **Forest Hydrology.** Tokyo: Kyoritsu, 1976. 185p.

- NELSON, W.R.; BAVER, L.D. Movement of water through soils in relation to the nature of the pores. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v.5, p.69-76, 1940.
- NEUMAN, S.P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements. **ASCE Hydraulics Div. J.**, New York, v.99(HY12), p.2233-2250, 1973.
- NIELSON, R.L. Effect of soil minerals on earthworms. **N. Z. J. Agric.**, Wellington, v.83, p.433-435, 1951.
- NISHIGAKI, M. Some aspects on hydraulic parameters of saturated-unsaturated regional ground-water flow. **J. Jap. Soc. Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Tokyo, v.23, n.3, p.165-177, 1983.
- NORDSTROM, S.; RUNDGREN, S. Environmental factors and lumbricid associations in southern Sweden. **Pedobiologia**, Jena, v.14, p.1-27, 1974.
- NYE, P.H. Some soil-forming processes in the humid tropics. 4. The action of the soil fauna. **J. Soil Sci.**, Oxford, v.6, p.73-83, 1955.
- OGAWA, S. Quantitative evaluation of water and soil conservation capacities of mountain slope forests. **Water Sci.**, Tokyo, v.27, n.1, p.10-23, 1983.
- OHNISHI, Y.; NISHIGAKI, M. Unsaturated flux of soil water. 3. Analysis of unsaturated flux (example). **Soil and Foundation**, Tokyo, v.29, n.8, p.37-45, 1981.
- OHTA, T.; FUKUSHIMA, Y.; SUZUKI, M. Research on runoff from hillsides by one-dimensional transient saturated-unsaturated flow. **J. Jap. For. Soc.**, Tokyo, v.65, p.125-134, 1983.
- OHTA, T.; KIDO, T. Influence of evapo-transpiration of forests on slope discharge-simulation of saturated-unsaturated throughflow using Richards' equation. **J. Jap. For. Soc.**, Tokyo, v.68, p.490-498, 1986.
- OKA, T. Soil moisture movement in a hilly watershed. Observations and numerical analyses. **Annuals Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.**, Kyoto, v.32(B-2), p.213-224, 1983.
- OKA, T. Rainfall infiltration and macropores in a hillside slope. **Annuals, Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.**, Kyoto, v.29 (B-2), p.279-289, 1986
- PAWLUK, S. Faunal micromorphological features in moder humus of some western Canadian soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.40, p.3-16, 1987.
- POKARZHEVSKY, A.D.; KRIVOLUTSKY, D.A. The role of pedobionts in biogeochemical cycles of calcium and strontium-90 in the ecosystems In: INT. COLLOQ. SOIL ZOOL. (5: 1973: Prague). **Progress in soil zoology**. Prague: Junk, 1975. p.249-254.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Editora Manole Ltda., 1987. 188p.
- REITZ, R.; KLEIN, R.M.; REIS, A. **Projeto madeira de Santa Catarina**. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 1978. 114p.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, New York, v.1, p.318-333, 1931.

- ROTTA, E.; DE OLIVEIRA, Y.M.M. Área de distribuição natural de bracinga (*Mimosa scabrella*). In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS. (4: 1981: Curitiba). **Bracinga uma alternativa para reflorestamento**. Curitiba: EMBRAPA-URPFCS, 1981. p.103-109.
- RUSSEL, E.W. **Soil conditions and plant growth**. 10th ed. London: Longman, 1973. 849p.
- SABINE, J.R. Earthworms as a source of food and drugs. In: SATCHELL, J.E. (ed.) **Earthworm ecology**. London: Chapman and Hall, 1983. p.285-296.
- SAMEDOV, P.A.; NADIROV, F.T. Effect of earthworms and woodlice on the physicochemical and surface properties of soils. **Soviet Soil Sci.**, New York, v.22, n.2, p.48-55, 1990.
- SATCHELL, J.E. (ed.) **Earthworm ecology: From Darwin to vermiculture**. London: Chapman and Hall, 1983. 495p.
- SHARPLEY, A.N.; SYERS, J.K. Potential role of earthworm casts for the phosphorus enrichment of run-off waters. **Soil Biol. Biochem.**, Elmsford, v.8, p.341-346, 1976.
- SHARPLEY, A.N.; SYERS, J.K.; SPRINGETT, J.A. Effect of surface-casting earthworms on the transport of phosphorous and nitrogen in surface runoff from pasture. **Soil Biol. Biochem.**, Elmsford, v.11, p.459-462, 1979.
- SHAW, C.; PAWLUK, S. The development of soil structure by *Octolasion tyrtaeum*, *Aporrectodea turgida*, and *Lumbricus terrestris* in parent materials belonging to different textural classes. **Pedobiologia**, Jena, v.29, p.327-339, 1986.
- SHERMAN, L.K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. **Engineering News-Record**, New York, v.108, p.501-505, 1932.
- SHINOMIYA, Y. **Formation process of hydraulic properties of forest soils**. Tokyo, 1993. 155p. Thesis (Master's degree of Agriculture) - Tokyo Univ. Agric. Tech.
- SHIPITALO, M.J.; EDWARDS, W.M.; DICK, W.A.; OWENS, L.B. Initial storm effects on macropore transport of surface applied chemicals in no-till soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.54, p.1530-1536, 1990.
- SHIPITALO, M.J.; PROTZ, R. Factors influencing the dispersibility of clay in worm casts. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.52, p.764-769, 1988.
- SKOPP, J. Comment on "Micro-, meso-, and macroporosity of soil". **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.45, p.1246, 1981.
- SLATER, C.S.; HOPP, H. Relation of fall protection to earthworm populations and soil physical conditions. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v.12, p.508-511, 1947.
- SMETTEN, K.R.J. The relationship of earthworms to soil hydraulic properties. **Soil Biol. Biochem.**, Elmsford, v.24, p.1539-1543, 1992.
- SMITH, B.J.; PETERSON, J.A. Studies of the giant Gibbsland earthworm *Megascolides australis* McCoy, 1878. **Victorian Naturalist**, South Yarra, v.99, p.164-172, 1982.

- SPAIN, A.V.; LAVELLE, P.; MARIOTTI, A. Stimulation of plant growth by tropical earthworms. *Soil Biol. Biochem.*, Elmsford, v.24, p.1629-1633, 1992.
- SPRINGETT, J.A.; GRAY, R.A.J.; REID, J.B. Effect of introducing earthworms into horticultural land previously denuded of earthworms. *Soil Biol. Biochem.*, Elmsford, v.24, p.1615-1622, 1992.
- STOCKDILL, S.M.J. Earthworms improve pasture growth. *N. Z. J. Agric.*, Wellington, v.98, p.227-233, 1959.
- STOCKDILL, S.M.J. The effect of earthworms on pastures. *Proc. N. Z. Ecol. Soc.*, Wellington, v.13, p.68-75, 1966.
- STOCKDILL, S.M.J. Effects of introduced earthworms on the productivity of New Zealand pastures. *Pedobiologia*, Jena, v.24, p.29-35, 1982.
- SUNADA, K.; HONG, T.F. Effects of slope conditions on direct runoff characteristics by the interflow and overland flow model. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.102, p.323-334, 1988.
- SUZUKI, M. The properties of a base-flow recession on small mountainous watersheds. 2. Influence of evapotranspiration on recession hydrographs. *J. Jap. For. Soc.*, Tokyo, v.66, 211-218, 1984.
- SUZUKI, M. Forest evapotranspiration theory. In: TSUKAMOTO, Y. (ed.) *Forest Hydrology*. Tokyo: Buneido, 1992. p.54-78.
- SWANK, W.T.; CROSSLEY JR., D.A. (eds.) *Forest hydrology and ecology at Coweeta*. New York: Springer-Verlag, 1988. 469p.
- TAKASAO, T.; SHIIBA, M. Incorporation of the effect of concentration of flow into the kinematic wave equations and its applications to runoff system lumping. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.102, p.301-322, 1988.
- TAKESHITA, K. Some considerations on the relation between forest soil and control function to river discharge. *Jap. J. Forest Environment*, Tokyo, v.27, p.19-26, 1985.
- TANI, M. The properties of a water-table rise produced by a one-dimensional, vertical, unsaturated flow. *J. Jap. For. Soc.*, Tokyo, v.64, p.409-418, 1982.
- TANI, M. Analysis of one-dimensional, vertical, unsaturated flow in consideration of runoff properties of a mountainous watershed. *J. Jap. For. Soc.*, Tokyo, v.67, p.449-460, 1985.
- THOMAS, G.W.; PHILLIPS, R.E. Consequences of water movement in macropores. *J. Environ. Qual.*, Madison, v.8, p.149-152, 1979.
- TISDALL, J.M. Ecology of earthworms in irrigated orchards. In: EMERSON, W.W.; BOND, R.D.; DEXTER, A.E. (eds.) *Modification of soil structure*. Chichester: Wiley, 1978. p.297-303.
- TISDALL, J.M. Earthworm activity in irrigated red-brown earths used for annual crops in Victoria. *Aust. J. Soil Res.*, Melbourne, v.23, p.291-299, 1985.
- TODD, D.K. Groundwater. In: CHOW, V.T. (ed.) *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1964. p.13.1-13.55.

- TROENDLE, C.A. **A comparison of soil-moisture loss from forested and clearcut areas in West Virginia.** USDA For. Service Res. Note, 1970. 8p. (NE-120).
- TROJAN, M.D.; LINDEN, D.R. Microrelief and rainfall effects on water and solute movement in earthworm burrows. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.56, p.727-733, 1992.
- TSUKAMOTO, Y. Analysis of hydrologic phenomena occurring in mountain watersheds. **Bull. Exp. For, Tokyo Univ. Agric. Tech.**, Tokyo, n.6, p.1-79, 1966.
- TSUKAMOTO, Y. (ed.) **Forestry Hydrology.** Tokyo: Buneido, 1992. 319p.
- TSUKAMOTO, Y.; OHTA, T. Introduction to forest works for water management. **Water Sci.**, Tokyo, v.28, n.3, p.28-61, 1984.
- URBÁNEK, J.; DOLEZAL, F. Review of some case studies on the abundance and on the hydraulic efficiency of earthworm channels in Czechoslovak soils, with reference to the subsurface pipe drainage. **Soil Biol. Biochem.**, Elmsford, v.24, p.1563-1571, 1992.
- VAN DE WESTERINGH, W. Deterioration of soil structure in worm free orchards. **Pedobiologia**, Jena, v.12, p.6-15, 1972.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.
- VAN HOOFF, P. Earthworm activity as a cause of splash erosion in a Luxembourg forest. **Geoderma**, Amsterdam, v.31, p.195-204, 1983.
- VAN RHEE, J.A. Earthworm activity and plant growth in artificial cultures. **Plant Soil**, Dordrecht, v.22, p.45-48, 1965.
- VAN RHEE, J.A. Inoculation of earthworms in a newly drained polder. **Pedobiologia**, Jena, v.9, p.128-132, 1969.
- VAN RHEE, J.A. A study of the effect of earthworms on orchard productivity. **Pedobiologia**, Jena, v.17, p.107-114, 1977.
- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.J. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiol.**, Lancaster, v.2, p.71-78, 1927.
- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.J. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. **Soil Sci.**, Baltimore, v.68, p.75-94, 1949.
- VIEIRA, M.I. **Criação de minhocas.** São Paulo: Nobel, 1986. 63p.
- VOMOCIL, J.A. Porosity. In: Black, C.A.(ed.) **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.** New York:Academic Press, 1965. p.299-314.
- VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Trans. Am. Soc. Agric. Engineers**, St. Joseph, v.4, p.242-246, 1961.
- VSEVOLODOVA-PEREL', T.S.; SIZEMSKAYA, M.L. Introduction of earthworms to the soil under forest plantations in the Caspian sea region. **Soviet Soil Sci.**, New York, v.22, n.1, p.20-26, 1990.

- WASAWO, D.P.S.; VISSER, S.A. Swampworms and tussock mounds in the swamps of Teso, Uganda. *East Afr. Agric. For. J.*, Nairobi, v.25, p.86-90, 1959.
- WATANABE, H. On the amount of cast production by the megascolecid earthworm *Pheretima hupeiensis*. *Pedobiologia*, Jena, v.15, p.20-28, 1975.
- WATANABE, K. Analysis of three-dimensional groundwater flow in the near-surface layer of a small watershed. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.102, p.287-300, 1988.
- WATERS, R.A.S. Earthworms and the fertility of pasture. In: CONF. N.Z. GRASSL. ASSOC. (13.: 1951: New Plymouth). *Proceedings*, New Plymouth, 1951. p.168-175.
- WATKIN, B.R.; WHEELER, J.L. Some factors affecting earthworm populations under pasture. *J. Br. Grassl. Soc.*, v.21, p.14-20, 1966.
- WILKINSON, G.E. Effect of grass fallow rotations on the infiltration of water into a savanna zone soil of Northern Nigeria. *Trop. Agric.*, Guildford, v.52, p.97-103, 1975.
- WILKINSON, G.E.; AINA, P.O. Infiltration of water into two Nigerian soils under secondary forest and subsequent arable cropping. *Geoderma*, Amsterdam, v.50, p.51-59, 1976.
- YASUHARA, M. Watershed response to a storm rainfall. *Sci. Rept.*, Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, Sect. A, Tsukuba, v.5, p.1-27, 1984.
- ZACHMANN, J.E.; LINDEN, D.R. Earthworm effects on corn residue breakdown and infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.53, p.1846-1849, 1989.
- ZACHMANN, J.E.; LINDEN, D.R. CLAPP, C.E. Macroporous infiltration and redistribution as affected by earthworms, tillage, and residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.51, p.1580-1586, 1987.
- ZRAZHEVSKII, A.I. Earthworms and the interrelations of tree and shrub species. *Priroda*, Moscow, v.47, p.96-98, 1958.